
ESTUDIO
NACIONAL
DEL AGUA
2022
Ambiente
IDEAM

# ESTUDIO NACIONAL DEL AGUA 2022

Ambiente

IDEAM

Con el apoyo de:

Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

**Embajada de Suiza en Colombia**
**Ayuda Humanitaria y Desarrollo (COSUDE)**

**GUSTAVO FRANCISCO PETRO URREGO**
Presidente de Colombia

**FRANCIA MÁRQUEZ**
Vicepresidenta de Colombia

**MARÍA SUSANA MUHAMAD GONZÁLEZ**
Ministra de Ambiente y Desarrollo Sostenible

**MAURICIO CABRERA LEAL**
Viceministro de Políticas y Normalización Ambiental

**LILIA TATIANA ROA AVENDAÑO**
Viceministra de Ordenamiento Ambiental del Territorio

## Consejo Directivo

**MARÍA SUSANA MUHAMAD GONZÁLEZ**
Ministra de Ambiente y Desarrollo Sostenible

**LILIA TATIANA ROA AVENDAÑO**
Viceministra de Ordenamiento Ambiental del Territorio

**FERNEY CAMACHO**
Director de Infraestructura - Ministerio de Transporte

**NÉSTOR ROBERTO GARZÓN CADENA**
Director de Cambio Climático y Gestión del Riesgo (e)

**PAOLA RICAURTE AYALA**
Asesora de la Dirección de Ambiente y Desarrollo Sostenible - Departamento Nacional de Planeación (DNP)

**SANDRA LILIANA MORENO MAYORGA**
Directora de la Dirección Técnica Geoestadística - Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE)

**HECNEY ALEXCEVITH ACOSTA**
Director general - Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS)

## Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam

**GHISLIANE ECHEVERRY PRIETO**
Directora general

**JUAN FERNANDO ACOSTA MIRKOW**
Secretario general

**FABIO ANDRÉS BERNAL QUIROGA**
Subdirector de Hidrología

**ELIZABETH PATIÑO CORREA**
Subdirectora de Estudios Ambientales

**LINA MARÍA CABALLERO VILLALOBOS**
Subdirectora de Ecosistemas e Información Ambiental

**TC. JORGE GIOVANNI JIMÉNEZ SÁNCHEZ**
Subdirector de Meteorología

**ÍNGRID TATIANA SIERRA GIRALDO**
Jefe de Oficina del Servicio de Pronóstico y Alertas

**CÉSAR AUGUSTO SÁNCHEZ WALDRON**
Jefe de Oficina Asesora de Planeación

**WILMER ESPITIA MUÑOZ**
Jefe de Oficina de Informática

**GILBERTO ANTONIO RAMOS SUÁREZ**
Jefe de Oficina Asesora Jurídica

**MARÍA EUGENIA PATIÑO JURADO**
Jefe de Oficina de Control Interno

## Producción editorial

**Subdirección de Hidrología**
Fabio Andrés Bernal Quiroga
Nelson Omar Vargas Martínez
(2013 - marzo, 2024)

**Coordinación técnica**
Martha García Herrán
Nelson Omar Vargas Martínez

**Coordinación editorial**
Catalina Herrera Barrientos
María Teresa Sánchez García
John Álvarez Restrepo
Ximena Marcela García Arango
**Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia - CTA**

Andrés Felipe Tapiero Ríos
**Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam**

**Edición cartográfica**
Luisa Fernanda Cruz Cárdenas

**Foto de portada**
Pexels: https://www.pexels.com/photo/waterfalls-in-forest-460621/

**Corrección de estilo**
Margarita Mejía Umaña
María Fernanda Monsalve

**Dirección de arte, diseño editorial, graficación y diagramación**
Andrés Felipe León Rodríguez
Juliana González Echeverri
Juan Camilo Díaz

**ISBN:** 978-958-5489-7

**Cítese como:** Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam (2023). *Estudio Nacional del Agua 2022.* Ideam.

**Publicación aprobada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam**

**Marzo 2023, Bogotá, D. C., Colombia**

**Distribución gratuita**

Todos los derechos reservados. Los textos pueden ser usados parcial o totalmente citando la fuente. Su reproducción total o parcial debe ser autorizada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam.

© Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam.

## Autores


Nelson Omar Vargas Martínez
Martha García Herrán
Fabio Andrés Bernal Quiroga
María Costanza Rosero Mesa
Carolina Vega Viviescas
Jorge Andrés González Rojas
Carlos Albeiro Figueroa Ortiz
Jorge Luis Ceballos Liévano
Emilio Andrés Gómez García
Sandra Patricia Salamanca Jiménez
Luis Eduardo Toro Espitia
Diego Arévalo Uribe
Consuelo Helena Onofre Encinales
Claudia Nicol Tetay Botía
Juan Esteban González Valencia
Omayda Cárdenas Bustamante
Jenny Paola Marín Salazar
Juan Gabriel Osorio Osuna
José Ville Triana
Julián David Urrea
Nelsy Verdugo Rodríguez
Yina Paola Nocua Ruge
Juan José Montoya Monsalve
Claudia Yaneth Contreras Trujillo
Gabriela Parada Puig
Carolina María Rodríguez Ortiz
Juan Fernando Figueroa Alzate
Yazari Agudelo Cano
Diana Patricia Díaz Jiménez
Gerardo Nava Tovar
Carlos Andrés Castañeda Orjuela
Beatriz Hernández Castillo
Lina Johanna Garzón Riveros
Julián Albeiro García Gómez (pasante UNAL)
Brayan Steven Benavides Bello (pasante UNAL)


## Colaboradores

| | |
|---|---|
| Asociación Colombiana del Petróleo y Gas (ACP) | **Henry A. Martínez** |
| Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) | **Juan Pablo Malagón Navarro**<br>**Cindy Julieth Rodríguez Rubio**<br>**Juliana Andrea Torres Cely**<br>**Óscar Alexander Varilla Quiroga** |
| Asociación de Bananeros de Colombia (Augura) | **Isabel Cristina Yoshioka Tamayo** |
| Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca (Aunap) | **Nicolás Castillo Peralta** |
| Autoridades Ambientales Regionales (Corporaciones Autónomas Regiones y Autoridades Ambientales Urbanas) | |
| Centro Nacional de Investigación del Café (Cenicafé) | **Nelson Rodríguez Valencia** |
| Consultores externos | **César Jiménez**<br>**Elías Pinto**<br>**Luz Consuelo Orjuela**<br>**Melisa Correa** |

| | |
|---|---|
| Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (Corantioquia) | **Andrea Báez** |
| Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) | **Sandra Liliana Niño García**<br>**Janet Vallejo Mayorga**<br>**Adriana Marcela González Mora** |
| Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) | **Luisa Marina Baena** |
| Corporación para el Desarrollo Sostenible de Urabá (Corpourabá) | **Pedro Pablo Villegas Yepes** |
| Corporación Autónoma Regional del Quindío (CRQ) | **Patricia Rojas Sánchez** |
| Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) | **Pilar Andrade Medina**<br>**Natalia Fresneda Granados**<br>**Jairo Puerto Meléndez** |
| Empresa Colombiana de Petróleos S. A. (Ecopetrol) | **Sandra Yamile Álvarez**<br>**Juan Diego Ramírez** |
| Ministerio de Defensa Nacional - Brigada Contra la Minería Ilegal (BRCMI) | **Lizz Hoyos Holguín** |
| Ente Nacional para la Energía Eléctrica (ENEL Colombia S. A.) | **Jorge Horacio Cadena Ordóñez** |
| Empresas Públicas de Medellín (EPM) | **Jorge Andrés Castillo** |
| Ev'eaulution | **Ana Karina Campillo** |
| Exdirectora del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) | **Yolanda González Hernández** |
| Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (Fedepalma) | **Nelson Londoño**<br>**Edwin Giovany Girón** |
| Federación Nacional de Avicultores de Colombia (Fenavi) | **Mónica Sánchez**<br>**Carlos Duque** |
| Fundación Natura: Organización Ambiental ONG Colombia | |
| Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) | **José Alejandro Ospina Niño**<br>**Germán Andrés Merchán Arévalo**<br>**Aura María Bustillo**<br>**Áreas operativas**<br>**Laboratorio de Calidad Ambiental**<br>**Paola Andrea Sánchez Farfán**<br>**Hernando Wilches**<br>**Gina Eugenia Moreno Bravo**<br>**Andrés Felipe Tapiero Ríos**<br>**Liz Johana Díaz**<br>**Martha Patricia León**<br>**Henry Benavides**<br>**Helmer Guzmán**<br>**Ana María Vesga**<br>**Julián David Páez Saavedra** |

| | |
|---|---|
| Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) | **Ricardo Andrés Gómez Moncada** |
| ISAGEN | **Mauricio Arango Berrío** |
| Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural | **Dionisio Ortiz** |
| Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible | **Dirección Integral de Recurso Hídrico**<br><br>**Luz Edith Ortega Rojas**<br>**Janeth Elena Ortega Ricardo** |
| Ministerio de Salud y Protección Social | **Secretarías de Salud departamentales y municipales**<br><br>**Entidades Territoriales de Salud** |
| Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio | **Zayda Janeth Sandoval Núñez**<br>**Mike Donald Bowie Mahecha**<br>**Esthefanny Victoria González Salcedo**<br>**Braulio Cano Burgos**<br>**José Edier Ballesteros Herrera**<br>**Liliana Alvarado Flores** |
| Parques Nacionales Naturales de Colombia | **Parque Nacional Natural Los Nevados**<br><br>**Parque Nacional Natural El Cocuy** |
| Prestadores de Servicios Públicos de Acueducto | |
| Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) | **Jesús Nieves Bermúdez** |
| Servicio Geológico Colombiano (SGC) | **Hugo Cañas Cervantes** |
| Pure Earth Colombia | **Alfonso Rodríguez** |
| Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios | **Karen Amanda Bustos Pineda**<br>**Jorge Martelo Pallares** |
| Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) | **Joana Pérez Betancourt**<br>**Miguel Ángel Vanegas Ramos** |
| Universidad de Antioquia | **Mateo Vásquez**<br>**María Fernanda Sierra**<br>**Sergio Restrepo Mejía**<br>**Teresita Betancur** |
| Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC) | **Laura Angélica Castro Díaz**<br>**Germán Andrés Clavijo Hincapié** |
| Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) | **Carlos Yecid Medina**<br>**Juan Carlos Loaiza**<br>**William Javier Henao Ramírez** |
| Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA) | **Luz Marina Arévalo Sánchez** |
| URRA SA. E. S. P. | **Enrique Kerguelen Méndez** |

# TABLA DE CONTENIDOS


## 1. Contexto geográfico y socioeconómico nacional

**1.1 Contexto geográfico ... 35**
1.1.1 Descripción topográfica ... 35
1.1.2 Hidrografía de Colombia y zonificación hidrográfica ... 41
1.1.3 Cuencas hidrográficas y acuíferos transfronterizos ... 46
1.1.4 Balance hídrico nacional ... 46
**1.2 Contexto socioeconómico ... 50**
1.2.1 Demografía ... 50
1.2.2 Contexto económico ... 53
1.2.3 Cobertura de acueducto y alcantarillado ... 57

## 2. Enfoque conceptual y metodológico de la evaluación integral delagua en el ENA 2022

**2.1 Síntesis del enfoque conceptual ... 63**
2.1.1 Ciclo del agua y ciclo de sedimentos ... 63
2.1.2 Sistema de indicadores hídricos ... 65
2.1.3 Enfoque del análisis integrado ... 67
**2.2 Alcance y procedimiento metodológico general .. 67**
2.2.1 Alcance ... 67
2.2.2 Procedimiento metodológico ... 68
2.2.3 Fuentes de información y cartografía de referencia ... 69
2.2.4 Sistema de coordenadas ... 70
2.2.5 Unidades espaciales y temporales de análisis ... 70
2.2.6 Componentes temáticos y afectaciones ... 71

## 3. Disponibilidad y variabilidad del agua superficial en Colombia

**3.1 Análisis de indicadores y oferta hídrica superficial natural ... 79**
3.1.1 Indicadores hídricos superficiales ... 80
3.1.2 Oferta hídrica superficial ... 86
**3.2 Análisis de los eventos de sequía en Colombia ... 102**
3.2.1 Antecedentes ... 103
3.2.2 Enfoque conceptual y metodológico ... 103
3.2.3 Análisis de índices multivariados de sequía para Colombia ... 106
3.2.4 Índice multivariado integrado de sequías integrado (IMSI) ... 126
3.2.5 Consideraciones y recomendaciones sobre eventos de sequía en Colombia ... 133
**3.3 Dinámica de las inundaciones y características de cuerpos de agua lénticos ... 133**
3.3.1 Dinámica de las inundaciones ... 133
3.3.2 Cuerpos de agua lénticos ... 150
3.3.3 Consideraciones y recomendaciones sobre inundaciones y cuerpos lénticos en Colombia .. 158
**3.4 Evolución y dinámica de los glaciares y su relación con la alta montaña ... 159**
3.4.1 Aspectos conceptuales y metodológicos ... 160
3.4.2 Evolución del área glaciar en Colombia ... 161
3.4.3 Balance de masa glaciar ... 163
3.4.4 Relaciones hídricas del sistema glaciar con los ecosistemas de la alta montaña ... 165
3.4.5. Conclusiones acerca de la dinámica glaciar e hídrica altoandina ... 168

## 4. Estado del conocimiento de las aguas subterráneas en Colombia


**4.1 Aspectos conceptuales** ... **173**
4.1.1 Modelos hidrogeológicos conceptuales ... 173
4.1.2 Importancia de las redes de monitoreo, información y evaluación para la gestión del recurso hídrico subterráneo en Colombia ... 174
4.1.3 Monitoreo de aguas subterráneas en Colombia a escalas nacional, regional y local ... 174
4.1.4 Inventario nacional de puntos de agua subterránea ... 175
**4.2 Aspectos metodológicos** ... **175**
**4.3 Avances del seguimiento y evaluación de las aguas subterráneas en las autoridades ambientales en Colombia** ... **178**
4.3.1 Caracterización del estado actual del monitoreo de aguas subterráneas a nivel regional ... 178
4.3.2 Actualización del inventario de puntos de agua subterránea a nivel nacional ... 184
4.3.3 Volúmenes y usos concesionados y captados de aguas subterráneas a nivel nacional ... 186
4.3.4 Fichas de sistemas acuíferos y mapa actualizado de estos ... 188
**4.4 Consideraciones sobre el monitoreo y evaluación de las aguas subterráneas en Colombia** ... **192**


## 5. Dinámica de sedimentos


**5.1 Conceptos y metodología** ... **197**
5.1.1 Procesos en ladera ... 199
5.1.2 Procesos en cauce ... 201
**5.2 Resultados y análisis para el territorio nacional** ... **202**
5.2.1 Erosión hídrica potencial ... 202
5.2.2 Relación de entrega en ladera ... 207
5.2.3 Rendimiento de sedimentos estimado a partir de datos observados ... 209
5.2.4 Rendimiento de sedimentos estimado a partir de balance de largo plazo ... 212
**5.3 Análisis integrado de sedimentos por área hidrográfica** ... **214**
5.3.1 Área hidrográfica Caribe ... 214
5.3.2 Área hidrográfica Magdalena-Cauca ... 217
5.3.3 Área hidrográfica Orinoco ... 220
5.3.4 Área hidrográfica Amazonas ... 223
**5.4 Consideraciones y recomendaciones sobre la dinámica de los sedimentos** ... **227**


## 6. Hidrología isotópica en Colombia


**6.1 Definiciones básicas** ... **231**
**6.2 Breve historia de la hidrología isotópica en Colombia** ... **233**
**6.3 El contenido isotópico de la lluvia en Colombia** ... **236**
6.3.1 Rectas meteóricas locales (RML) ... 237
6.3.2 Variación temporal de la composición isotópica de la lluvia en Colombia ... 247
**6.4 Ejemplos de estudios de caso realizados en Colombia** ... **252**
6.4.1 Nitrato en el agua subterránea ... 252
6.4.2 La «edad» del agua subterránea ... 256
6.4.3 Identificación de zonas de recarga de acuíferos ... 260
6.4.4 Conexión entre agua superficial y subterránea ... 263


## 7. Usos del agua en Colombia


**7.1 Aspectos generales de los usos del agua** ... **271**
7.1.1 Bases generales conceptuales y metodológicas de los usos del agua para ENA 2022 ... 271

7.1.2 Evolución de los conceptos asociados a los usos del agua y sus implicaciones ..... 273
**7.2 Uso del agua sectorial y multisectorial** ..... **274**
7.2.1 Evolución de los usos del agua en Colombia ..... 274
7.2.2 Usos del agua a nivel nacional – análisis sectorial ..... 277
7.2.3 Flujos de retorno ..... 281
7.2.6 Distribución geográfica de usos sectoriales por departamentos, áreas y subzonas hidrográficas ..... 290
**7.3 Indicadores desarrollados a partir del uso del agua** ..... **319**
7.3.1 Relación entre la demanda hídrica y la oferta disponible (IUA) ..... 319
7.3.2 Relación entre la huella hídrica azul y la oferta disponible (IARC) ..... 323
7.3.3 Evaluación de la sostenibilidad de la huella hídrica verde (IPHE) ..... 326
7.3.4 Relación entre la demanda y la huella hídricas azul (IEUA) ..... 329
**7.4 Flujos de agua virtual** ..... **332**
**7.5 Proyecciones de uso de agua 2021-2040** ..... **334**
7.5.1 Proyección demanda hídrica sector agrícola a 2040 ..... 338
7.5.2 Proyección demanda hídrica sector pecuario a 2040 ..... 342
7.5.3 Proyección demanda hídrica sector hidrocarburos a 2040 ..... 343
7.5.4 Proyección demanda hídrica sector minero a 2040 ..... 344
7.5.5 Proyección demanda hídrica sector energía a 2040 ..... 344
7.5.6 Proyección demanda hídrica sector servicios a 2040 ..... 346
7.5.7 Proyección demanda hídrica uso de agua doméstica a 2040 ..... 347
**7.6 Consideraciones sobre los usos del agua en Colombia** ..... **348**

## 8. Calidad del agua en Colombia

**8.1 Aspectos conceptuales y metodológicos** ..... **353**
8.1.1 Elementos conceptuales ..... 353
8.1.2 Procedimiento metodológico general ..... 354
**8.2 Análisis de las condiciones de la calidad del agua en Colombia** ..... **359**
8.2.1 Cargas analizadas a la altura del punto de monitoreo ..... 359
8.2.2 Análisis de la calidad del agua a partir de la concentración analizada para carbono orgánico total, nitrógeno amoniacal, oxígeno disuelto y sólidos totales ..... 361
8.2.3 Concentración de metales pesados en sedimentos ..... 361
8.2.4 Índice de calidad del agua ..... 365
8.3 Presión sobre la calidad del agua ..... 370
8.3.2 Cargas contaminantes generadas por los sectores usuarios del agua y removidas por sistemas de tratamiento de aguas residuales ..... 378
**8.3.3 Uso de mercurio** ..... **380**
8.3.4 Uso de agroquímicos en la agricultura ..... 383
8.3.5 Uso de sustancias químicas para la transformación de coca como uso ilícito ..... 387
8.3.6 Índice de alteración potencial de la calidad del agua (IACAL) ..... 388
**8.4 Ventana regional cuenca Río Bogotá** ..... **390**
8.4.1 Análisis de la calidad del agua a partir de la concentración analizada en los puntos de monitoreo corriente principal y afluentes ..... 391
8.4.2 Índice de calidad del agua ..... 391
8.4.3 Presión sobre la calidad del agua ..... 395
8.4.4 Índice de alteración potencial de la calidad del agua ..... 395
**8.5 Uso de plaguicidas en Colombia** ..... **396**
8.5.1 Metodología ..... 398
8.5.2 Uso de plaguicidas 2017-2021 ..... 398

8.5.3 Discusión de resultados ... 404
**8.6 Consideraciones sobre calidad de agua y uso de plaguicidas en Colombia ... 409**

## 9. Susceptibilidad al desabastecimiento hídrico en municipios

**9.1 Enfoque conceptual y metodológico ... 415**
9.1.1 Listado de municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada seca y temporada de lluvia ... 416
9.1.2 Delimitación de cuencas abastecedoras de acueductos municipales ... 416
**9.2 Susceptibilidad al desabastecimiento en temporadas seca y de lluvia ... 418**
9.2.1 Municipios susceptibles al desabastecimiento por temporada seca ... 418
9.2.2 Municipios susceptibles al desabastecimiento por temporada de lluvia ... 425
**9.3 Cuencas abastecedoras de acueductos municipales ... 434**
**9.4 Consideraciones en el tema de desabastecimiento municipal ... 439**

## 10. Objetivos de Desarrollo Sostenible en Colombia – ODS 6

**10.1 Aportes del Ideam para el reporte de indicadores ODS 6 ... 444**
10.1.1 Indicador 6.3.2 - Proporción de masas de agua de buena calidad ... 445
10.1.2 Indicador 6.4.1 - Cambio en el uso eficiente de los recursos hídricos con el paso del tiempo e indicador 6.4.2 - Nivel de estrés hídrico: extracción de agua dulce en proporción a los recursos de agua dulce disponibles ... 447
10.1.3 Indicador 6.5.2 - Proporción de la superficie de cuencas transfronterizas sujetas a arreglos operacionales para la cooperación en materia de aguas ... 448
**10.2 Consideraciones sobre aportes del Ideam a indicadores ODS 6 ... 450**

## 11. Análisis integrado del agua en Colombia

**11.1 Esquema metodológico del análisis integrado del agua en Colombia ... 455**
**11.2 Análisis de variabilidad de la oferta hídrica y dinámica de sequías y sedimentos ... 455**
11.2.1 Variabilidad de la oferta hídrica ... 455
11.2.2 Dinámica de sequías ... 458
11.2.3 Dinámica de sedimentos ... 458
**11.3 Análisis de afectaciones al agua por intervención antrópica ... 459**
11.3.1 Presiones por uso ... 459
11.3.2 Presiones por contaminación ... 465
11.3.3 Elementos de riesgo asociados al desabastecimiento hídrico ... 467
**11.4 Análisis integrado del agua por subzona hidrográfica ... 471**

## 12. Consideraciones finales de la evaluación integrada del agua en Colombia

## Referencias Bibliográficas

# LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Fronteras terrestres y marítimas de Colombia (IGAC, 2005). ..... 36
Figura 2. Mapa del relieve de Colombia (IGAC, 2005). ..... 38
Figura 3. Mapa de la zonificación hidrográfica de Colombia (Ideam, 2013, modificado en 2022). ..... 43
Figura 4. Subzonas hidrográficas transfronterizas. ..... 47
Figura 5. Sistemas acuíferos transfronterizos de Sudamérica (Unesco, 2017). ..... 48
Figura 6. Balance hídrico nacional. ..... 49
Figura 7. Departamentos por población para el 2020 según estimaciones del DANE (2018). ..... 51
Figura 8. Áreas de reglamentación especial étnica y comunidades étnicas. Total nacional (DANE, 2014) ... 54
Figura 9. Ciclo del agua. ..... 64
Figura 10. Sistema de indicadores hídricos para la evaluación del agua ENA 2022. ..... 66
Figura 11. Esquema metodológico para el Estudio Nacional del Agua 2022. ..... 68
Figura 12. Mapa del índice de aridez en Colombia. ..... 81
Figura 13. Distribución del índice de aridez por área hidrográfica. ..... 82
Figura 14. Esquematización de la curva de duración de caudales y los volúmenes para el cálculo del IRH. ..... 83
Figura 15. Mapa del índice de regulación hídrica en Colombia. ..... 84
Figura 16. Distribución del índice de regulación hídrica a nivel de área hidrográfica. ..... 85
Figura 17. Mapa nacional de escorrentía anual multianual de año medio. ..... 88
Figura 18. Mapas nacionales de escorrentía mensual multianual de año medio. ..... 89
Figura 19. Mapa nacional de escorrentía anual multianual de año seco. ..... 91
Figura 20. Mapas nacionales de escorrentía mensual multianual de año seco. ..... 92
Figura 21. Mapa nacional de escorrentía anual multianual de año húmedo. ..... 93
Figura 22. Mapas nacionales de escorrentía mensual multianual de año húmedo. ..... 94
Figura 23. Esquematización del modelo hidrológico Dynamic Water Balance DWB. ..... 96
Figura 24. Escorrentías medias anuales por área hidrográfica para el periodo 1982-2021, resultantes del modelo DWB. ..... 96
Figura 25. Gráficas de variabilidad de la escorrentía mensual en las zonas hidrográficas del área Amazonas ..... 97
Figura 26. Gráficas de variabilidad de la escorrentía mensual en las zonas hidrográficas del área Caribe. ..... 98
Figura 27. Gráficas de variabilidad de la escorrentía mensual en las zonas hidrográficas del área Magdalena - Cauca. ..... 99
Figura 28. Gráficas de variabilidad de la escorrentía mensual en las zonas hidrográficas del área Orinoco ..... 100
Figura 29. Gráficas de variabilidad de la escorrentía mensual en las zonas hidrográficas del área Pacífico ..... 101
Figura 30. Metodología para generación de índices de sequía. ..... 104
Figura 31. Identificación eventos sequía en orden nacional, índice escorrentía agregación 24 meses. ..... 107
Figura 32. Eventos de sequía identificados con índices univariados e índice multivariado agregado para 24 meses. ..... 109
Figura 33. Porcentaje área territorio nacional para cada categoría de intensidad de sequía, periodo 1983-2020, índice estandarizado univariado, precipitación con periodo de agregación de 24 meses. ..... 110
Figura 34. Series temporales correspondientes a los índices de precipitación con diferentes periodos de agregación. ..... 112

Figura 35. Índice multivariado, con diferentes periodos de agregación. ....112
Figura 36. Índices univariados e índice multivariado para Colombia en agregación de 24 meses. ....113
Figura 37. Eventos de El Niño y La Niña a partir del indicador ONI. ....113
Figura 38. Evolución espaciotemporal del índice multivariado (IEMS) precipitación-humedad del suelo-escorrentía entre mayo de 2016 y julio de 2017, para un periodo de agregación de 24 meses. ....115
Figura 39. Número de eventos de sequía identificados usando el índice de precipitación para diferentes agregaciones temporales, a nivel de zona hidrográfica. ....117
Figura 40. Porcentaje área zona hidrográfica Baudó directos Pacífico para cada categoría de intensidad de sequía, periodo 1983-2020, índice estandarizado univariado, precipitación con periodo de agregación de 24 meses. ....118
Figura 41. Serie temporal índice multivariado (IEMS) de zona hidrográfica Baudó directos Pacífico. ....119
Figura 42. Series de índices multivariados y univariados para el departamento del Chocó, ventana temporal de 1984 a 1994. ....120
Figura 43. Espacialización índice multivariado precipitación humedad del suelo - escorrentía, con agregación 24 meses, meses de febrero y marzo de 1987....121
Figura 44. Número de eventos de sequía identificados para diferentes periodos de agregación, usando el índice de precipitación, y a nivel departamental....123
Figura 45. Extensión espacial índice multivariado precipitación humedad del suelo escorrentía en el departamento del Chocó. ....124
Figura 46. Serie temporal índice multivariado (IEMS) precipitación-humedad del suelo-escorrentía, agregación 24 meses, departamento del Chocó. ....125
Figura 47. Espacialización índice multivariado precipitación-humedad del suelo-escorrentía, agregación 24 meses, meses de febrero y marzo de 1987, nivel nacional y departamento del Chocó. ....125
Figura 48. Series de índices multivariados y univariados para el departamento del Chocó, ventana temporal de 1984 a 1994. ....127
Figura 49. Clasificación índice multivariado integrado de sequías. ....128
Figura 50. Índice integrado de sequías multivariado por zonas hidrográficas, agregación tres meses. ....130
Figura 51. Índice integrado multivariado de sequías por departamentos, agregación tres meses. ....131
Figura 52. Distribución del porcentaje de desastres por tipo de amenaza con respecto al total mundial (izq.) y porcentaje de desastres con respecto al total de Suramérica (der.). ....135
Figura 53. Metodología para la definición de ZPI y cuerpos de agua. ....136
Figura 54. Metodología para la identificación de zonas intervenidas por actividad antrópica dentro de las ZPI. ....139
Figura 55. Zonas potencialmente inundables naturales o seminaturales e intervenidas por actividad antrópica. ....142
Figura 56. Coberturas de extensión de inundaciones por fenómenos de La Niña 1988, 2000, 2011 y 2012. ....144
Figura 57. Número de eventos de inundación en los niveles departamental y municipal registrados en el periodo ....145
comprendido entre los años 2000 y 2021; consolidado del reporte de emergencias (UNGRD, 2021). ....145
Figura 58. Número de eventos de avenidas torrenciales y crecientes súbitas en los niveles departamental y municipal registrados en el periodo comprendido entre los años 2000-2021, consolidado del reporte de emergencias 2018-2021 (UNGRD, 2021). ....146
Figura 59. Consolidado de eventos de inundación a nivel nacional para el periodo comprendido entre 2000 y 2021. ....147
Figura 60. Consolidado de eventos de avenidas torrenciales a nivel nacional para el periodo comprendido entre los años 2015 y 2021. ....147
Figura 61. Localización de municipios con estudios de amenaza por inundación (datos Ideam). ....148
Figura 62. Topobatimetría del lago de Tota. ....153

Figura 63. Curvas de capacidad del lago de Tota. ..... 154
Figura 64. Esquema Programa de Modelación Ecohidrológica. ..... 155
Figura 65. Sitio demostrativo de ecohidrología, PHI-Unesco, Complejo Cenagoso Zapatosa. ..... 156
Figura 66. Comportamiento multianual de frecuencia de inundaciones en el sitio demostrativo de ecohidrología, PHI Unesco, Complejo Cenagoso Zapatosa. ..... 157
Figura 67. Comportamiento de sedimentos suspendidos, escenario cierre caño Cachaco, sitio ..... 158
demostrativo de ecohidrología PHI-Unesco Complejo Cenagoso Zapatosa. ..... 158
Figura 68. Glaciares actuales en Colombia y su fragmentación. ..... 160
Figura 69. Evolución de la cobertura glaciar en Colombia en las últimas seis décadas. ..... 162
Figura 70. Glaciar Santa Isabel, sector Conejeras. Comparación entre 2010 (arriba) y 2022 (abajo). ..... 162
Figura 71. Balance de masa multianual del glaciar Santa Isabel, sector Conejeras. ..... 163
Figura 72. Balance de masa multianual de la Sierra Nevada El Cocuy o Güicán, sector Ritacuba Blanco. 164
Figura 73. Espesor del manto de nieve anual. Periodo 2008 al 2022 en los glaciares Ritacuba Blanco, del Parque Nacional Natural El Cocuy, y Conejeras, ubicado en el Parque Nacional Natural Los Nevados. ..... 164
Figura 74. Rendimiento hídrico medio mensual (Q) para días con temperatura inferior a 2 °C (azul) y días con temperatura superior a 2 °C (rojo). Indicación del evento El Niño 2015-2016 (sombreado gris), punto de quiebre en evolución de la producción de agua (línea discontinua) y precipitación mensual (barras azules). ..... 165
Figura 75. Caudal promedio en los ecosistemas de alta montaña. Caso cuenca río Claro. ..... 166
Figura 76. Caudal promedio en los ecosistemas de alta montaña. Caso cuenca del río Cardenillo, Güicán de la Sierra, Boyacá. El caudal de cada ecosistema incluye el (los) del ecosistema inmediatamente superior. ..... 166
Figura 77. Tipos de redes de monitoreo de agua subterráneas en Colombia. ..... 175
Figura 78. Esquema metodológico para el capítulo de aguas subterráneas, ENA 2022. ..... 176
Figura 79. Cantidad de puntos monitoreados por la autoridad ambiental. ..... 181
Figura 81. Caracterización de variables monitoreadas por autoridades ambientales. ..... 181
Figura 80. Tendencias de las frecuencias de monitoreo. ..... 181
Figura 82. Porcentaje de parámetros monitoreados. ..... 182
Figura 83. Mapa de puntos de redes de monitoreo de aguas subterráneas por autoridades ambientales. ..... 183
Figura 84. Resultados de clasificación por tIpo de puntos de agua subterránea. ..... 184
Figura 85. Clasificación por condición de puntos de agua subterránea. ..... 184
Figura 86. Porcentajes de volúmenes concesionados en m³ por autoridad en el periodo 2016-2021. ..... 186
Figura 87. Volúmenes captados en m³ por autoridades ambientales en el periodo 2016-2021. ..... 187
Figura 88. Ficha de información del sistema acuífero SAM 4.11 Súnuba. ..... 189
Figura 89. Ficha de información del sistema acuífero SAM 6.9 Río Risaralda. ..... 190
Figura 90. Mapa de los sistemas acuíferos de Colombia 2022. ..... 191
Figura 91. Procesos del ciclo de sedimentos predominantes dentro de una cuenca hidrográfica. ..... 197
Figura 92. Esquema marco metodológico y conceptual. ..... 198
Figura 93. Mapas calculados para estimar valores de erosión potencial hídrica. ..... 200
Figura 94. Esquema índice de conectividad. ..... 201
Figura 95. Esquema simplificado de balance de sedimentos ..... 202
Figura 96. Mapas mensuales de erosión hídrica potencial, distribuidos en celdas de 30 m. ..... 203
Figura 97. Mapas mensuales de erosión hídrica potencial agregados por subzona hidrográfica. ..... 204
Figura 98. Variabilidad anual de la erosión hídrica potencial, número de subzonas en cada categoría para cada mes. ..... 205
Figura 99. Mapa de erosión hídrica potencial: a la izquierda distribuido en celdas de 30 m y a la derecha agregado por subzonas hidrográficas. ..... 206

Figura 100. Subzonas en cada rango de erosión hídrica potencial por área hidrográfica. ..... 207
Figura 101. Mapa de erosión hídrica potencial en ladera: a la izquierda distribuido en celdas de 30 m y a la derecha agregado por subzonas hidrográficas. ..... 208
Figura 102. Subzonas en cada rango de relación de entrega en ladera por área hidrográfica. ..... 209
Figura 103. Distribución por categorías del rendimiento de sedimentos tanto por áreas como por número de estaciones. ..... 209
Figura 104. Rendimiento de sedimentos de las cuencas aferentes a las estaciones analizadas. ..... 210
Figura 105. Cambios en rendimiento de sedimentos en estaciones con al menos un año de información adicional. ..... 212
Figura 106. Comparación de datos de rendimientos estimados con estaciones y estimados a partir de balance de sedimentos. ..... 212
Figura 107. Mapa de rendimiento estimado a partir de balance de sedimentos de largo plazo. ..... 213
Figura 108. Distribución espacial de rendimiento de sedimentos estimado a partir de balance. ..... 214
Figura 109. Área hidrográfica Caribe: variabilidad anual de la erosión hídrica potencial y número de subzonas en cada categoría para cada mes. ..... 215
Figura 110. Número de subzonas en cada categoría de erosión hídrica potencial para el área hidrográfica Caribe. ..... 215
Figura 111. Número de subzonas en cada categoría de relación de entrega en ladera para el áre hidrográfica Caribe. ..... 216
Figura 112. Distribución espacial por categorías de rendimiento estimado con balance, área hidrográfica Caribe. ..... 217
Figura 113. Variabilidad anual de la erosión hídrica potencial, número de subzonas en cada categoría para cada mes, área hidrográfica Magdalena-Cauca. ..... 217
Figura 114. Número de subzonas en cada categoría de erosión hídrica potencial para el área hidrográfica Magdalena-Cauca. ..... 218
Figura 115. Número de subzonas en cada categoría de relación de entrega en ladera para el área hidrográfica Magdalena-Cauca. ..... 218
Figura 116. Distribución espacial por categorías de rendimiento estimado con balance, área hidrográfica Magdalena-Cauca. ..... 220
Figura 117. Variabilidad anual de la erosión hídrica potencial, número de subzonas ..... 221
en cada categoría para cada mes, área hidrográfica Orinoquía. ..... 221
Figura 118. Número de subzonas en cada categoría de erosión hídrica potencial para el área hidrográfica Orinoquía. ..... 221
Figura 119. Número de subzonas en cada categoría de relación de entrega en ladera para el área hidrográfica Orinoquía. ..... 221
Figura 120. Distribución espacial por categorías de rendimiento estimado con balance, área hidrográfica Orinoquía. ..... 222
Figura 121. Variabilidad anual de la erosión hídrica potencial, número de subzonas en cada categoría para cada mes, área hidrográfica Amazonía. ..... 223
Figura 122. Número de subzonas en cada categoría de erosión hídrica potencial para el área hidrográfica Amazonía. ..... 223
Figura 123. Número de subzonas en cada categoría de relación de entrega en ladera para el área hidrográfica Amazonía. ..... 224
Figura 124. Distribución espacial por categorías de rendimiento estimado con balance, área hidrográfica Amazonía. ..... 224
Figura 125. Variabilidad anual de la erosión hídrica potencial, número de subzonas en cada categoría para cada mes, área hidrográfica Pacífico. ..... 225
Figura 126. Número de subzonas en cada categoría de erosión hídrica potencial para el área hidrográfica Pacífico. ..... 225

Figura 127. Número de subzonas en cada categoría de relación de entrega en ladera para el área hidrográfica Pacífico. ....226
Figura 128. Distribución espacial por categorías de rendimiento estimado con balance, área hidrográfica Pacífico. ....226
Figura 129. Localización proyectos de hidrología isotópica y estaciones de las redes RNI y GNIP.....235
Figura 130. Componentes de una recta meteórica hipotética. ....237
Figura 131. (a) Métodos alternativos de regresión lineal. (b) Efectos de la evaporación en el exceso de deuterio. ....239
Figura 132. Rectas meteóricas locales estimadas para dos estaciones usando cuatro métodos de regresión.....240
Figura 133. Localización puntos de observación con datos de agua lluvia.....242
Figura 134. Pendiente e intercepto de la recta meteórica local, por región.....245
Figura 135. Promedios ponderados por cantidad de lluvia.....246
Figura 136. Oxígeno-18 versus altitud, promedios ponderados por cantidad de lluvia. ....246
Figura 137. Oxígeno-18 y exceso de deuterio, estación GNIP-Bogotá . Posición de ZCIT tomada de Waliser y Gautier (1993). ....248
Figura 138. Variación mensual del oxígeno-18 y precipitación, varias estaciones. ....251
Figura 139. Variación temporal del oxígeno-18 en cuatro estaciones, en el periodo junio de 2019 a marzo de 2020. ....252
Figura 140. Desnitrificación en el agua subterránea. ....253
Adaptado de Rivett et al. (2008). ....253
Figura 141. Tipos de molécula de nitrato y evolución isotópica durante la desnitrificación. La posición de A depende de las fuentes de nitrato; la posición de B depende de A y del desarrollo de la desnitrificación. ....254
Figura 142. Nitrato en el acuífero somero del Abanico del Quindío. Datos de CRQ. ....255
Figura 143. Nitrógeno-15 y oxígeno-18 en nitratos en el agua subterránea (círculos azules). El tamaño de los círculos es directamente proporcional a la concentración de nitrato. Datos de CRQ. ....255
Figura 144. Ventanas de tiempo abarcadas por algunas técnicas isotópicas para estimar el tiempo promedio de residencia del agua subterránea. La T se refiere al tritio ($^{3}H$). ....257
Figura 145. Algunos modelos de flujo utilizados para interpretar los datos suministrados por las técnicas de datación. Las «edades» estimadas también dependen de la forma como se recolectan las muestras de agua. ....258
Figura 146. Actividades de radiocarbono. Datos en negrita, en unidades de «porcentaje de carbono moderno» (pcm) y edades no corregidas (datos en paréntesis, en años).....259
Figura 147. Oxígeno-18 en puntos de observación de radiocarbono, acuífero Formación Corpa (T2B). ..259
Figura 148. Estimación del gradiente isotópico altitudinal; caso hipotético con cuatro colectores. Datos en el diagrama inferior corresponden a promedios ponderados por cantidad de lluvia. ....261
Figura 149. Área de estudio, red instalada por Palacio y Betancur (2007). ....262
Figura 150. Gradiente isotópico altitudinal estimado para el Bajo Cauca antioqueño. ....263
Figura 151. Caudal y contenido isotópico del arroyo Lainbach. ....265
Figura 152. Área de estudio, proyecto Alianza Biocuenca.....266
Figura 153. Composición isotópica de la lluvia y quebrada Valegrá (Mutiscua, Norte de Santander). ....266
Figura 154. Uso del agua azul multisectorial 2008-2020 (demanda hídrica y huella hídrica azul).....275
Figura 155. Uso del agua verde agrícola y pecuaria 2008-2020 (huella hídrica verde).....276
Figura 156. Participación sectorial en la demanda hídrica nacional en 2020. ....278
Figura 157. Comparación de la participación sectorial en la demanda hídrica total 2008-2020. ....278
Figura 158. Mapa de distribución sectorial de la demanda hídrica en Colombia. ....279
Figura 159. Huella hídrica azul sectorial como porcentaje de la demanda hídrica en 2016 y 2020. ....281
Figura 160. Áreas hidrográficas. Demanda de agua y huella hídrica azul. ....283

Figura 161. Distribución de la huella hídrica verde agropecuaria por área hidrográfica. ..... 284
Figura 162. Participación en la demanda hídrica por subzona hidrográfica, 2020. ..... 284
Figura 163. Mapa de demanda hídrica en Colombia 2020. ..... 285
Figura 164. Participación porcentual en la huella hídrica azul total por subzona hidrográfica, 2020. ..... 286
Figura 165. Mapa de la huella hídrica azul en Colombia. ..... 287
Figura 166. Participación porcentual en la huella hídrica verde total por subzona hidrográfica, 2020. ..... 288
Figura 167. Mapa de la huella hídrica verde en Colombia. ..... 289
Figura 168. Participación sectorial en la demanda hídrica por área hidrográfica. ..... 290
Figura 169. Participación sectorial en la huella hídrica azul por área hidrográfica. ..... 292
Figura 170. Participación de la demanda hídrica multisectorial por departamento. ..... 293
Figura 171. Composición sectorial de la demanda hídrica por departamento. ..... 294
Figura 172. Usos de agua (demanda hídrica y huella hídrica azul) sector agrícola por SZH. ..... 297
Figura 173. Demanda hídrica del sector agrícola por departamento. ..... 298
Figura 174. Mapa de distribución temporal de la huella hídrica azul en Colombia. ..... 299
Figura 175. Mapa de distribución temporal de la huella hídrica verde en Colombia. ..... 300
Figura 176. Usos de agua (demanda hídrica y huella hídrica azul), sector pecuario por SZH. ..... 302
Figura 177. Demanda hídrica sector pecuario por departamento. ..... 303
Figura 178. Usos de agua (demanda hídrica y huella hídrica azul) del sector piscícola por SZH. ..... 304
Figura 179. Demanda hídrica sector piscícola por departamento. ..... 305
Figura 180. Usos de agua (demanda hídrica y huella hídrica azul), sector industria por SZH. ..... 306
Figura 181. Demanda hídrica sector industria por departamento. ..... 307
Figura 182. Usos de agua (demanda hídrica y huella hídrica azul), sector hidrocarburos por SZH. ..... 308
Figura 183. Demanda hídrica del sector hidrocarburos por departamento. ..... 309
Figura 184. Usos de agua (demanda hídrica y huella hídrica azul) sector minería por SZH. ..... 310
Figura 185. Demanda hídrica sector minería por departamento. ..... 311
Figura 186. Usos de agua (demanda hídrica y huella hídrica azul) sector energía por SZH. ..... 312
Figura 187. Demanda hídrica sector energía por departamento. ..... 313
Figura 188. Usos de agua (demanda hídrica y huella hídrica azul), sector doméstico por SZH. ..... 314
Figura 189. Comparación de uso de agua sector doméstico y población, 2020. ..... 315
Figura 190. Demanda hídrica sector doméstico por departamento. ..... 316
Figura 191. Usos de agua (demanda hídrica y huella hídrica azul) sector servicios por SZH. ..... 317
Figura 192. Demanda hídrica sector servicios por departamento. ..... 318
Figura 193. Distribución porcentual de estado de IUA por SZH en Colombia, año medio. ..... 320
Figura 194. Distribución porcentual de estado de IUA por SZH en Colombia, año seco. ..... 320
Figura 195. Número de SZH y cambio de estado de IUA por área hidrográfica (AH) para condición de año medio y año seco. ..... 321
Figura 196. Listado de SZH en estado crítico de IUA en año seco y estado para año medio. ..... 322
Figura 197. Distribución porcentual de estado de IARC por SZH en Colombia, año medio. ..... 324
Figura 199. Número de SZH y cambio de estado de IARC por AH para condición de año medio y año seco. ..... 324
Figura 198. Distribución porcentual de estado de IARC por SZH en Colombia, año seco. ..... 324
Figura 200. Mapa nacional IARC por SZH en Colombia, año medio. ..... 325
Figura 201. Listado de SZH en estado crítico de IARC en año seco y estado para año medio. ..... 326
Figura 202. Distribución porcentual de estado de IPHE por SZH en Colombia. ..... 327
Figura 203. Listado de SZH en estado crítico de IPHE en año medio. ..... 328
Figura 204. Distribución porcentual de estado de IEUA por SZH en Colombia en un año hidrológico medio. ..... 330
Figura 205. Mapa nacional IEUA por SZH en Colombia, año medio. ..... 331
Figura 206. Distribución de flujos de agua virtual total. Colombia, 2020. ..... 333

Figura 207. Destino de flujos de agua virtual exportados desde Colombia, 2020. ....333
Figura 208. Proporción de agua verde y agua azul por cultivo en flujos de agua virtual desde Colombia, 2020. ....334
Figura 209. Proyección de demanda hídrica agrícola para principales cultivos permanentes (millones de $m^3$/año). ....340
Figura 210. Proyección de demanda hídrica agrícola para principales cultivos transitorios (millones de $m^3$/año). ....341
Figura 211. Proyección demanda de agua poscosecha. Escenarios 2021-2040. ....342
Figura 212. Proyección demanda de agua sector pecuario. Escenarios 2021-2040. ....343
Figura 213. Proyecciones de demanda de agua del sector hidrocarburos. Escenarios 2021 - 2040. ....343
Figura 214. Proyecciones de demanda de agua sector minería. Escenarios 2021-2040. ....344
Figura 215. Proyecciones de agua embalsada 2019-2034. Elaborado con base en UPME, 2020. ....345
Figura 216. Proyecciones de demanda de agua de termoeléctricas. Escenarios 2021-2040. ....346
Figura 217. Proyecciones de demanda de agua, sector servicios. Escenarios 2021-2040. ....347
Figura 218. Proyecciones demanda de agua doméstica. Escenarios 2021-2040. ....347
Figura 219. Evaluación del estado de calidad del agua y presión sobre el recurso hídrico. ....354
Figura 220. Procedimiento metodológico para la evaluación de la calidad del agua y presiones por contaminación (ENA 2022) ....355
Figura 221. Cargas contaminantes de DQO, ST, NT y PT calculadas por punto de monitoreo. ....360
Figura 222. Variables de calidad del agua en los puntos de monitoreo a partir de concentración de carbono orgánico total, OD, nitrógeno amoniacal y sólidos totales. ....362
Figura 223. Concentración de níquel y plomo potencialmente biodisponible. ....363
Figura 224. Concentración de cobre y cromo potencialmente biodisponible. ....363
Figura 225. Concentración de aluminio y hierro potencialmente biodisponible. ....364
Figura 226. Concentración de manganeso y de zinc potencialmente biodisponible. ....364
Figura 227. Concentración mercurio total en sedimentos. ....365
Figura 228. Índice de calidad del agua 2021. ....366
Figura 229. Índice de calidad del agua en el río Cauca 2021. ....368
Figura 230. Índice de calidad del agua en el río Magdalena 2021. ....369
Figura 231. Índice de calidad del agua en el río Bogotá 2021. ....370
Figura 232. Índice de calidad del agua en el río Chicamocha 2021 ....370
Figura 233. Carga contaminante potencialmente vertida a las corrientes hídricas (t/año) 2020. ....371
Figura 234. Carga contaminante estimada por área hidrográfica 2020. ....372
Figura 235. Presión estimada de DBO por subzona hidrográfica 2020. ....373
Figura 236. Presión estimada de DQO por subzona hidrográfica 2020. ....375
Figura 237. Presión estimada de SST por subzona hidrográfica 2020. ....377
Figura 238. Plataforma Toxic Sites Identification Program (TSIP). ....380
Figura 239. Planet Gold Colombia. ....381
Figura 240. Reporte de algunos indicadores Planet Gold Colombia. ....381
Figura 241. Plataforma Piragua. ....382
Figura 242. Reporte de mercurio incautado años 2021 y 2022. ....384
Figura 243. Demanda nacional potencial de agroquímicos en el sector agrícola. ....385
Figura 244. Comparativo de la cantidad de agroquímicos (toneladas) potencialmente usados en los años 2008, 2012, 2016, 2019 y 2020. ....386
Figura 245. Comparativo de la cantidad de agroquímicos (litros) potencialmente usados en los años 2008, 2012, 2016, 2019 y 2020. ....386
Figura 246. Uso de sustancias químicas en los procesos de transformación de coca como uso ilícito por departamento en 2020. ....387

Figura 247. Comparación de sustancias químicas empleadas en la transformación de la coca en Colombia. ..... 388
Figura 248. Índice de alteración potencial de la calidad del agua (IACAL) año medio y seco 2022. ..... 389
Figura 249. Variables de calidad del agua en los puntos de monitoreo a partir de concentración de carbono orgánico total, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, coliformes totales, demanda química de oxígeno y sólidos totales (muestreo 1). ..... 392
Figura 250. Variables de calidad del agua en los puntos de monitoreo a partir de concentración de carbono orgánico total, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, coliformes totales, demanda química de oxígeno y sólidos totales (muestreo 2). ..... 393
Figura 251. Índice de calidad del agua cuenca Río Bogotá 2021. ..... 394
Figura 252. Índice de calidad del agua en el río Bogotá 2021, CAR. ..... 395
Figura 253. Cargas contaminantes vertidas a nivel subsiguiente en la cuenca del río Bogotá. ..... 396
Figura 254. Porcentaje de uso de plaguicidas por grupo químico, Colombia, 2017-2021. ..... 399
Figura 255. Municipios con reporte de uso de plaguicidas, Colombia, 2017-2021 ..... 402
Figura 256. Esquema metodológico para la actualización del listado de municipios susceptibles al desabastecimiento. ..... 417
Figura 257. Esquema metodológico para la delimitación y caracterización de cuencas abastecedoras y estimación de indicadores hídricos en dichas unidades de análisis. ..... 417
Figura 258. Distribución de los 565 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada seca. Periodo 1998-2021. ..... 419
Figura 259. Distribución de los 207 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada seca. Periodo 2017-2021. ..... 420
Figura 260. Distribución a nivel departamental de la recurrencia de las afectaciones en los 207 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada seca. Periodo 2017-2021. ..... 421
Figura 261. Distribución a nivel departamental del área que ha presentado afectaciones en los 207 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada seca. Periodo 2017-2021. ..... 422
Figura 262. Distribución de los resultados del índice de sequía (MSDIPreSmoEsc) en los 207 ..... 423
municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada seca. ..... 423
Figura 263. Potencialidad de uso de aguas subterráneas en los municipios susceptibles desabastecimiento por temporada seca de dieciséis departamentos. ..... 424
Figura 264. Distribución por área hidrográfica de los 207 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada seca. ..... 424
Figura 265. Distribución por zona hidrográfica de los 207 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada seca. ..... 425
Figura 266. Distribución de los 835 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada de lluvia. Periodo 1998-2021. ..... 426
Figura 267. Distribución de los 254 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada de lluvia. Periodo 2017-2021. ..... 427
Figura 268. Eventos asociados con lluvia que ocasionaron afectaciones en al abastecimiento de los 254 municipios susceptibles. ..... 428
Figura 269. Distribución a nivel departamental de la recurrencia de las afectaciones en los 254 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada de lluvia. Periodo 2017-2021. ..... 429
Figura 270. Distribución a nivel departamental del área que ha presentado afectaciones en los 254 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada de lluvia. Periodo 2017-2021. ..... 429
Figura 271. Erosión hídrica potencial en los 254 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada de lluvia. ..... 430
Figura 272. Distribución por área hidrográfica de los 254 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada de lluvia. ..... 430
Figura 273. Distribución por zona hidrográfica de los 254 municipios susceptibles al

desabastecimiento en temporada de lluvia. ..... 431
Figura 274. Distribución por tipo de fuente hídrica de abastecimiento en los 69 municipios seleccionados para el análisis. ..... 434
Figura 275. Fuentes abastecedoras de acueductos de 69 municipios en Colombia. ..... 435
Figura 276. Distribución del índice de ..... 436
aridez en cuencas abastecedoras. ..... 436
Figura 277. Distribución del índice de retención y ..... 436
regulación hídrica (IRH) en cuencas abastecedoras. ..... 436
Figura 278. Distribución del indicador de rendimiento de sedimentos en cuencas abastecedoras. ..... 437
Figura 279. Distribución del indicador de sequías MSDIPreSmoEsc03 en 69 cuencas abastecedoras. Periodo 2017-2020. ..... 437
Figura 280. Metas del ODS 6, llamado Agua limpia y saneamiento. ..... 443
Figura 281. Indicadores asociados a metas ODS con las cuales tiene compromisos el Ideam a través de la subdirección de Hidrología. ..... 444
Figura 282. Variables medidas en el Nivel 1 para indicador ODS 6.3.2 ..... 445
Figura 283. Puntos de monitoreo sobre el río Bogotá para el reporte del ODS 6.3.2. ..... 446
Figura 284. Insumos entregados por el Ideam para el reporte de los indicadores ODS 6.4.1 y 6.4.2. ..... 448
Figura 285. Dominios temáticos, componentes e indicadores del análisis integrado del agua. ..... 456
Figura 286. Clasificación índice multivariado integrado de sequías. ..... 458
Figura 287. Índice de uso de agua para condiciones hidrológicas promedio y extremas de año seco. ..... 460
Figura 287. Índice de uso de agua para condiciones hidrológicas promedio y extremas de año seco. ..... 461
Figura 288. Índice de presión hídrica a los ecosistemas. ..... 464
Figura 289. Índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento para condiciones hidrológicas promedio y de año seco. ..... 468
Figura 289. Índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento para condiciones hidrológicas promedio y de año seco. ..... 469
Figura 290. Evaluación integrada del agua por subzona hidrográfica. ..... 473

# LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Caudales medios anuales de algunos de los ríos más largos y caudalosos de Colombia. ..... 44
Tabla 2. Población de la capital como proporción de la población del departamento. ..... 52
Tabla 3. PIB total para 2008, 2012, 2016, 2020 y tasa de crecimiento anual PIB per cápita. ..... 53
Tabla 4. PIB por grandes ramas de actividad económica (primario, secundario, terciario) para 2020 y tasa de crecimiento anual. ..... 55
Tabla 5. Actividades económicas año 2020 por municipio en miles de millones de pesos corrientes. ..... 56
Tabla 6. Distribución porcentual, variación absoluta y contribución a la variación de la población ocupada según rama de actividad. Total nacional (2022/2023). ..... 56
Tabla 7. Cobertura de acueducto y alcantarillado. ..... 58
Tabla 8. Parámetros del Nuevo origen único nacional. ..... 70
Tabla 9. Categorías del índice de aridez. ..... 80
Tabla 10. Categorías del índice de regulación hídrica. ..... 83
Tabla 11. Variables medias multianuales de oferta hídrica por área hidrográfica para el periodo 1991-2020. ..... 87
Tabla 12. Oferta hídrica disponible de año medio por área hidrográfica para el periodo 1991- 2020..... 95
Tabla 13. Categorías de intensidad de sequía, ..... 106
monitor norteamericano de sequías. ..... 106
Tabla 14. Eventos de sequía identificados a nivel nacional..... 107
Tabla 15. Resumen eventos identificados a nivel nacional, periodo 1983 - 2020. ..... 108
Tabla 16. Resumen de eventos identificados a nivel departamental, periodo 1983-2020. ..... 111
Tabla 17. Resumen de evento de sequía identificado en 2016, índices con periodo de agregación de 24 meses. ..... 114
Tabla 18. Eventos de sequía identificados, clasificados por índices multivariados (MV) y por índices univariados (UV). ..... 116
Tabla 19. Eventos en análisis departamental para diferentes índices. ..... 122
Tabla 20. Índice integrado de sequías en zonas hidrográficas..... 129
Tabla 21. Índice integrado de sequías por departamentos. ..... 132
Tabla 22. Clasificación de las amenazas por tipo de desastre..... 134
Tabla 23. Áreas de zonas potencialmente inundables y ecosistemas acuáticos (cuerpos de agua) por zona hidrográfica ..... 136
Tabla 24. Áreas de zonas potencialmente inundables naturales y transformadas. ..... 140
Tabla 25. Mapas de inundación generados entre 2018 y 2021 a escala 1:2000. ..... 149
Tabla 26. Distribución de cuerpos de agua lénticos por zona hidrográfica. ..... 150
Tabla 27. Estudios realizados sobre cuerpos lénticos a nivel local. ..... 152
Tabla 28. Evolución de la cobertura glaciar en Colombia. ..... 161
Tabla 29. Cuantías hídricas de cada ecosistema de alta montaña. Cuenca del río Claro (Villamaría, Caldas) y cuenca del río Cardenillo (Güicán de la Sierra, Boyacá)..... 167
Tabla 30. Caracterización de redes de monitoreo de aguas subterráneas a nivel regional por autoridades ambientales. ..... 179
Tabla 31. Parámetros de calidad monitoreados por las autoridades ambientales. ..... 182
Tabla 32. Reporte de inventario de puntos de aguas subterráneas clasificados por tipo ycondición. ..... 185
Tabla 33. Volúmenes concesionados y captados (2016-2021). ..... 186
Tabla 34. Volumen ($m^3$) concesionado por usos (2016-2021). ..... 187
Tabla 35. Volumen ($m^3$) captado por usos (2016-2021). ..... 188

Tabla 36. Fichas de sistemas acuíferos actualizadas. ..... 188
Tabla 37. Descripción de la información base empleada en el análisis. ..... 199
Tabla 38. Rangos adoptados para la erosión hídrica potencial en ladera, adaptado de Ideam (2018). ..... 202
Tabla 39. Comparación del transporte de sedimentos en suspensión entre valores del ENA 2018 y el ENA 2022. ..... 211
Tabla 40. Valores altos y muy altos de rendimiento de sedimentos medido en estaciones en el área hidrográfica Caribe. ..... 216
Tabla 41. Valores altos y muy altos de rendimiento de sedimentos medido en estaciones ..... 219
en el área hidrográfica Magdalena-Cauca. ..... 219
Tabla 42. Valores altos y muy altos de rendimiento de sedimentos medido en estaciones en el área hidrográfica Orinoquía. ..... 222
Tabla 43. Valores altos y muy altos de rendimiento de sedimentos medido en estaciones en el área hidrográfica Pacífico. ..... 226
Tabla 44. Proyectos de hidrología isotópica (búsqueda no exhaustiva). ..... 234
Tabla 45. Rectas meteóricas locales obtenidas con el método RMA y promedios ponderados por cantidad de lluvia. ..... 243
Tabla 46. Demanda hídrica por sectores 2008-2020. ..... 277
Tabla 47. Demanda hídrica y huella hídrica azul por sectores 2016 y 2020. ..... 280
Tabla 48. Flujos de retorno de agua de los sectores, 2020. ..... 282
Tabla 49. Distribución porcentual de la demanda hídrica por área hidrográficas y sectores. ..... 291
Tabla 50. Participación de la huella hídrica azul por área hidrográficas y sectores. ..... 292
Tabla 51. Cultivos permanentes para el ENA 2022. ..... 295
Tabla 52. Cultivos transitorios para el ENA 2022. ..... 296
Tabla 53. Clasificación de tipos de pastos para el ENA 2022. ..... 296
Tabla 54. Eficiencias asignadas al tipo de riego para los sistemas de riego en Colombia. ..... 297
Tabla 55. Participación de los tipos de ganado en el uso de agua del sector pecuario (2016 y 2020). ..... 301
Tabla 56. Rangos de evaluación IUA. ..... 319
Tabla 57. Rangos de evaluación IARC. ..... 323
Tabla 58. Rangos de evaluación IPHE. ..... 327
Tabla 59. Rangos de evaluación IEUA. ..... 329
Tabla 60. Descripción de escenarios (optimista, tendencial y pesimista) para proyecciones de uso de agua. ..... 336
Tabla 61. Cultivos priorizados para proyecciones de demanda hídrica agrícola. ..... 338
Tabla 62. Diferencia porcentual de precipitación estimada para escenario de cambio climático con horizonte 2040. ..... 339
Tabla 63. Valor proyectado quinquenal de demanda hídrica por cultivo permanente millones de $m^3$/año). ..... 340
Tabla 64. Valor proyectado quinquenal de demanda hídrica por cultivo transitorio (millones de $m^3$/año). ..... 342
Tabla 65. Categorización del índice de calidad del agua. ..... 356
Tabla 66. Información emisarios submarinos para tratamiento de aguas residuales domésticas. ..... 358
Tabla 67. Puntos de monitoreo con categoría «malo» del ICA 2021. ..... 367
Tabla 68. Subzonas hidrográficas con mayores aportes de carga de DBO, 2020. ..... 374
Tabla 69. Subzonas hidrográficas con mayores aportes de carga de DQO, 2020. ..... 376
Tabla 70. Subzonas hidrográficas con mayores aportes de carga de SST, 2020. ..... 378
Tabla 71. Carga contaminante generada por los sectores usuarios y removida en sistemas de tratamiento de aguas residuales, 2020. ..... 379
Tabla 72. Municipios con nuevos reportes de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas 379
en 2020 con respecto al ENA 2018 ..... 379

Tabla 73. Porcentajes de remoción de carga contaminante a nivel nacional, sectores industrial y doméstico, en 2020 con respecto al ENA 2018. ..... 380
Tabla 74. Reporte de mercurio incautado años 2021 y 2022. ..... 383
Tabla 75. Reporte de agroquímicos expresados en toneladas para los ENA 2010, 2014 y 2018, y para el año 2020. ..... 385
Tabla 76. Reporte de agroquímicos expresados en litros para los ENA 2010, 2014, 2018, y para el año 2020. ..... 386
Tabla 77. Índice de alteración potencial de la calidad del agua (IACAL), río Bogotá. ..... 396
Tabla 78. Porcentaje de uso de plaguicidas por categoría toxicológica, Colombia, 2017-2021. ..... 399
Tabla 79. Número de participantes y reporte de plaguicidas por departamento en doce departamentos de Colombia, 2017-2021. ..... 400
Tabla 80. Porcentaje de uso de plaguicidas por grupo químico y departamento, Colombia, 2017-2021. ..... 401
Tabla 81. Número de cultivos reportados en Colombia por departamento, 2017-2021. ..... 403
Tabla 82. Grupos de cultivos, participación y siembra, Colombia 2017-2021. ..... 404
Tabla 83. Municipios susceptibles al desabastecimiento tanto en temporada seca como en temporada de lluvia. ..... 432
Periodo 2017-2021. ..... 432
Tabla 84. Análisis de calidad del agua en cuencas abastecedoras. ..... 438
Tabla 85. Índice de variabilidad de la oferta hídrica natural (VOH). ..... 457
Tabla 86. Variabilidad de la oferta hídrica, subzonas por categoría y área hidrográfica. ..... 457
Tabla 87. Erosión hídrica potencial efectiva (EHPE). ..... 459
Tabla 88. Erosión hídrica potencial efectiva, subzonas por categoría y área hidrográfica. ..... 459
Tabla 89. Rangos de evaluación IUA. ..... 462
Tabla 90. Índice de uso de agua, subzonas por categoría y área hidrográfica. ..... 462
Tabla 91. Categorías de porcentaje de transformación de zonas potencialmente inundables. ..... 463
Tabla 92. Rangos de evaluación IPHE. ..... 463
Tabla 93. Índice de presión hídrica sobre los ecosistemas, subzonas por categoría y área hidrográfica. ..... 465
Tabla 94. Categorías del índice de alteración potencial de la calidad del agua. ..... 465
Tabla 95. Índice de alteración potencial de la calidad de agua, subzonas por categoría y área hidrográfica. ..... 466
Tabla 96. Categorías de presión por uso de sustancias químicas en producción y transformación de coca ..... 467
Tabla 97. Índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento, subzonas por categoría y por área hidrográfica. ..... 470
Tabla 98. Categorías para el análisis integrado según el índice de afectación por desabastecimiento hídrico. ..... 471
Tabla 99. Categorías para el análisis integrado de subzonas hidrográficas y priorización por afectación al agua. ..... 472
Tabla 100. Análisis integrado, subzonas por área hidrográfica y categoría de análisis. ..... 472
Tabla 101. Subzonas hidrográficas en categoría muy alta en condiciones hidrológicas extremas de año seco ..... 474
Tabla 102. Subzonas hidrográficas en categoría alta en condiciones hidrológicas extremas de año seco ..... 475

# INTRODUCCIÓN

El agua y los recursos hídricos constituyen el eje de cualquier gestión orientada a satisfacer necesidades humanas, mejorar la salud de los ecosistemas, planificar y definir estrategias para garantizar óptimas condiciones de aprovechamiento energético y, desde luego, proteger y cuidar la Vida como estrategia esencial de la sostenibilidad de los territorios y el planeta en general.

Esta premisa supone conocer el estado y la dinámica del agua, su distribución y disponibilidad, las presiones por uso, las afectaciones a su calidad fisicoquímica y ecológica, las respuestas hidrológicas a la variabilidad y el cambio climático, las vulnerabilidades y riesgo asociados al agua, y los efectos de las intervenciones en los sistemas hídricos del país. En este sentido, el Estudio Nacional del Agua del Ideam es un documento fundamental para comprender las fases y procesos del ciclo del agua en Colombia, desde una visión integral que permita soportar acciones y estrategias adecuadas para la Gestión integral del agua y la Seguridad hídrica.

En esta oportunidad, en el ENA2022, el Ideam presenta actualizaciones a las versiones anteriores, que se extienden desde 1998 al presente. Se mejoran las aproximaciones conceptuales y metodológicas para abordar los contenidos temáticos del estudio y se procesa la información con mejores resoluciones temporales y espaciales para abarcar las cinco áreas hidrográficas (Magdalena-Cauca, Caribe, Pacífico, Orinoquía y Amazonía), las 41 zonas hidrográficas, las 316 subzonas hidrográficas del país y los 66 sistemas acuíferos identificados en los ENA anteriores. Como aporte especial, se presenta información sobre cuencas abastecedoras de acueductos para 69 municipios de Colombia.

Los contenidos temáticos de disponibilidad del agua superficial, estado del conocimiento de las aguas subterráneas, glaciares, sedimentos, uso y demanda del agua, huella hídrica, agua virtual, calidad del agua, desabastecimiento hídrico por condiciones extremas, inundaciones, alternativas de uso conjunto agua superficial- agua subterránea e innovaciones temáticas y metodológicas en los temas de sequía e isotopía hacen del Estudio un documento de obligatoria consulta para todos los sectores. Adicionalmente, se abren nuevos espacios y oportunidades para la investigación científica y el fortalecimiento del monitoreo hidrometeorológico y ambiental del país.

El Estudio presenta además un sistema de indicadores para traducir la información técnico-científica a cualquier institución, gremio, comunidad o para la ciudadanía en general. También se disponen algunos anexos de utilidad para entidades territoriales y ambientales, sectores económicos, instituciones académicas, centros de investigación, ONG y organizaciones sociales. Al final del estudio se realiza un análisis integrado para categorizar condiciones de criticidad en las áreas, zonas y subzonas hidrográficas del país.

El ENA 2022 se apoya en series hidrometeorológicas y productos ambientales desarrollados por las subdirecciones de Hidrología, Meteorología, Ecosistemas y Estudios Ambientales del Ideam (un instituto del Sistema Nacional Ambiental, responsable de la evaluación de los recursos naturales renovables de Colombia). Y no menos importante, el ENA también se soporta en la información y estadísticas oficiales de cerca de 50 entidades y asociaciones gremiales que participaron junto con un grupo selecto de 30 expertos nacionales de cada temática en una construcción interdisciplinaria e interinstitucional liderada por la subdirección de Hidrología del Ideam, que es la responsable de este producto como autoridad hidrológica nacional para dar cuenta de la evaluación del agua y los recursos hídricos de Colombia.

De esta manera, se pone a disposición del país una versión actualizada del ENA que refleja el estado de la información y conocimiento del agua en el país, como referente para gestionar, planificar, tomar decisiones y, ante todo, crear conciencia en las instituciones, sectores económicos y en la sociedad toda sobre la necesidad inaplazable de aprovechar de manera sostenible, proteger, conservar, restaurar y cuidar el patrimonio hídrico nacional y la salud de los ecosistemas. Esta intención solo es posible a partir de la articulación institucional, y de la participación de la academia y de las comunidades asentadas en los territorios, puesto que el agua es un asunto de interés y responsabilidad general.

# PRÓLOGO

El Ideam, desde sus inicios en 1994, ha tenido como propósito dar cuenta del estado y la dinámica del agua, sus presiones por uso, las afectaciones a su calidad por intervención antrópica y las proyecciones más allá de los intereses sectoriales. Esta aproximación al conocimiento de los sistemas hídricos, tanto superficiales como subterráneos, parte de un riguroso seguimiento permanente y sistemático que se realiza en todas las subzonas hidrográficas del país, y que es complementado con las estadísticas y dominios de conocimiento relevantes que se generan en entidades generadoras de información sectorial.

En este Estudio Nacional del Agua (ENA) 2022, como en los correspondientes a 1998, 2000, 2004, 2008, 2010, 2014 y 2018, se aborda con profundidad la interrelación entre las diferentes áreas de conocimiento, hidrología, meteorología, ecología, geología, economía y química, principalmente, logrando una aproximación ambiental al conocimiento de la realidad del país, como lo atestiguan los resultados del trabajo presentado en esta nueva versión del estudio. Los avances presentados son notables para entender la interdependencia del agua con la biodiversidad, el suelo, el subsuelo y la atmósfera, que es determinante para las fases y los procesos del ciclo hidrológico sobre el cual se soporta la evaluación del agua y el recurso hídrico.

Este abordaje integral hace comprensible, entre otros aspectos, su dinámica, condiciones de ocurrencia y distribución, características de uso y calidad, y la respuesta hidrológica a la variabilidad y cambio climático. Evidencia, además, la complejidad del asunto y la necesidad de asumirlo interdisciplinariamente, con cimientos conceptuales, bases científicas y métodos sólidos. Esta rigurosidad técnico-científica, que parte del manejo de datos e información –y se extiende al análisis integrado–, está reflejada en resultados de alta confiabilidad. El estudio, asimismo, proyecta escenarios que deben considerarse, necesariamente, para la planeación y el desarrollo económico y social del país.

De esta manera, el Ideam entrega a Colombia un documento de referencia nacional con alta relevancia para la gestión integral del agua. Los resultados y productos presentados a través de textos, tablas, figuras y mapas, donde se espacializan las variables e indicadores hídricos, constituyen, sin duda, una fuente de información esencial para la sociedad en general, las instituciones, los sectores económicos y los investigadores que quieran contar para sus desarrollos con información rigurosamente procesada y sistematizada sobre oferta, demanda, usos, huella hídrica y agua virtual, calidad, afectaciones por variabilidad climática, isotopía, glaciares, aguas subterráneas, sequías, desabastecimiento por condiciones climáticas extremas, inundaciones, y, por supuesto, un análisis integrado que permite reconocer los ámbitos y dominios espaciales de criticidad por diferentes temáticas, con el objetivo de priorizar acciones y estrategias orientadas a la conservación, el cuidado y el aprovechamiento sostenible del patrimonio hídrico del país.

Para la construcción del ENA 2022, se convocaron expertos temáticos y académicos que, de manera interdisciplinaria, aportaron sus habilidades intelectuales en la construcción de contenidos coherentes y pertinentes enfocados en lograr una evaluación que supera anteriores estudios y pone una vara alta para las actualizaciones futuras. Adicionalmente, se convocaron cerca de 50 instituciones generadoras de información, con el fin de afianzar, afinar la trazabilidad y dar confiabilidad a las fuentes de soporte técnico y científico del documento.

Finalmente, es importante reseñar que este importante estudio plantea retos y abre nuevas fronteras de investigación que deben ser atendidas por la institucionalidad, la academia y los centros de investigación, y, no menos importante, para la comunicación y difusión de resultados a todos los niveles de la sociedad y el territorio.

Es necesario que el país continúe avanzando, desde la narrativa de las instituciones, las acciones eficaces y efectivas, y la visión sistémica, en la búsqueda de soluciones, cambios de comportamiento y ajuste a las acciones recurrentes inconvenientes para el cuidado del agua, a partir del conocimiento que brinda el ENA 2022, los estudios anteriores y los subsiguientes, con el propósito de soportar el ordenamiento del territorio alrededor del agua y toda iniciativa o emprendimiento que propenda por el mejoramiento de la calidad de vida y el futuro de una sociedad que debe progresar cuidando el patrimonio natural, base fundamental de la vida y la cultura.

**Ghisliane Echeverry Prieto**
Directora general
Instituto de Hidrología, Meteorología
y Estudios Ambientales - Ideam

# LISTADO DE SIGLAS

| | |
|---|---|
| **A&A** | Aguas y Aguas de Pereira. |
| **ABC** | Agencia Brasileña de Cooperación. |
| **ACP** | Asociación Colombiana del Petróleo y Gas. |
| **AEVAL** | Agencia Estatal de Evaluación de las Políticas Públicas y la Calidad de los Servicios. (Existió en España hasta 2017) |
| **AH** | Áreas hidrográficas. |
| **AID** | Áreas de influencia directa. |
| **AII** | Áreas de influencia indirecta. |
| **AMVA** | Área Metropolitana del Valle de Aburrá. |
| **ANA/Brasil** | Agencia Nacional de Aguas de Brasil. |
| **ANDEG** | Asociación Nacional de Empresas Generadoras. |
| **ANLA** | Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. |
| **ANM** | Agencia Nacional de Minería. |
| **AUNAP** | Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca. |
| **AWDO** | Asian Water Development Outlook. |
| **BID** | Banco Interamericano de Desarrollo. |
| **CAM** | Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena. |
| **CAR** | Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. |
| **CARDER** | Corporación Autónoma Regional de Risaralda. |
| **Cardique** | Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique. |
| **Carsucre** | Corporación Autónoma Regional de Sucre. |
| **CC** | Cambio climático. |
| **CDA** | Corporación para el Desarrollo Sostenible del Norte y Oriente Amazónico. |
| **CDC** | Curva de duración de caudales. |
| **CDMB** | Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga. |
| **CdeT** | Centro de Transparencia. (de Minenergía) |
| **CE** | Conductividad eléctrica. |
| **CHIRPS** | Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data. |
| **CIIU** | Clasificación Industrial Internacional Uniforme. |
| **CNPV** | Censo Nacional de Población y Vivienda. |
| **Codechocó** | Corporación Autónoma Regional para el Desarrollo Sostenible del Chocó. |
| **COE** | Contaminantes orgánicos emergentes. |
| **Condesan** | Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina. |
| **Coralina** | Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. |
| **Corantioquia** | Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia. |
| **Cormacarena** | Corporación para el Desarrollo Sostenible del Área de Manejo Especial La Macarena. |
| **Cornare** | Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare. |
| **Corpamag** | Corporación Autónoma Regional del Magdalena. |
| **Corpoamazonía** | Corporación para el Desarrollo Sostenible del Sur de la Amazonia. |
| **Corpoboyacá** | Corporación Autónoma Regional de Boyacá. |
| **Corpocaldas** | Corporación Autónoma Regional de Caldas. |

| | |
|---|---|
| **Corpocesar** | Corporación Autónoma Regional del Cesar. |
| **Corpochivor** | Corporación Autónoma Regional de Chivor. |
| **Corpoguajira** | Corporación Autónoma Regional de La Guajira. |
| **Corpoguavio** | Corporación Autónoma Regional del Guavio. |
| **Corpomojana** | Corporación para el Desarrollo Sostenible de la Mojana y el San Jorge. |
| **Corponariño** | Corporación Autónoma Regional de Nariño. |
| **Corponor** | Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental. |
| **Corporinoquía** | Corporación Autónoma Regional de la Orinoquía. |
| **Corpourabá** | Corporación para el Desarrollo Sostenible de Urabá. |
| **Cortolima** | Corporación Autónoma Regional del Tolima. |
| **COT** | Carbono orgánico total. |
| **CPC** | Clasificación Central de Productos. |
| **CRA** | Corporación Autónoma Regional del Atlántico. |
| **CRC** | Corporación Autónoma Regional del Cauca. |
| **CRED** | Centro de Investigación sobre la Epidemiología de los Desastres. |
| **CRQ** | Corporación Autónoma Regional del Quindío. |
| **CSB** | Corporación Autónoma Regional del Sur de Bolívar. |
| **CT** | Coliformes totales. |
| **CVC** | Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. |
| **CVIEC** | Comisión de Vecindad e Integración fronteriza Ecuador-Colombia. |
| **CVS** | Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge. |
| **DADMA** | Departamento Administrativo Distrital del Medio Ambiente. |
| **DAGMA** | Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente. |
| **DANE** | Departamento Administrativo Nacional de Estadística. |
| **DAS** | Departamento de América del Sur. |
| **DBO** | Demanda bioquímica de oxígeno. |
| **DQO** | Demanda química de oxígeno. |
| **DWB** | Dynamic Water Balance. |
| **EAI** | Encuesta Ambiental Industrial. |
| **EAM** | Encuesta Anual Manufacturera. |
| **EAS** | Encuesta Anual de Servicios. |
| **ECV** | Encuesta de Calidad de Vida. |
| **EDAR** | Estación Depuradora de Aguas Residuales. |
| **EHPE** | Índice de erosión hídrica potencial efectiva. |
| **EM-DAT** | Base de Datos sobre Eventos de Emergencia. |
| **EMS** | Encuesta Mensual de Servicios. |
| **ENA** | Encuesta Nacional Agropecuaria. |
| **ENSO** | El Niño-Oscilación del Sur. (también llamado ENOS) |
| **EPA** | Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. (siglas en inglés) |
| **ERA** | Evaluación Regional del Agua. |
| **ESAG** | Encuesta de Sacrificio de Ganado. |
| **ETS** | Entidades Territoriales de Salud. |
| **EVA** | Evaluaciones Agropecuarias Municipales. |
| **FAO** | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. |
| **FH-PH** | Fracturamiento Hidráulico Multietapa con Perforación Horizontal. |
| **FMAM** | Fondo para el Medio Ambiente Mundial. (o GEF, por sus siglas en inglés) |
| **Fonade** | Fondo Financiero de Proyectos de Desarrollo. |
| **FUNIAS** | Formulario Único Nacional de Inventario de Puntos de Agua Subterránea, |

| | |
|---|---|
| **GEF** | Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM o Global Environment Facility. (por sus siglas en inglés) |
| **GMWL** | Línea de agua meteórica global. (Global Meteoric Water Line) |
| **GNIP** | Red Mundial de Isótopos en la Precipitación. (siglas en inglés) |
| **GRU** | Unidades de respuesta grupal. (Grouped Response Unit) |
| **GWP** | Asociación Mundial para el Agua. (Global Water Partnership) |
| **HSDR** | Relación de Entrega en Ladera. |
| **IA** | Índice de aridez. |
| **IACAL** | Índice de alteración potencial de la calidad del agua. |
| **IADH** | Índice de afectación por desabastecimiento hídrico. |
| **IAEA** | International Atomic Energy Agency. |
| **IAH** | Índice de afectación del abastecimiento hídrico. |
| **IAN** | Instituto de Asuntos Nucleares. |
| **IARC** | Índice de agua no retornada a la cuenca. |
| **IC** | Índice de conectividad. |
| **ICA** | Índice de calidad del agua. |
| **ICBF** | Instituto Colombiano de Bienestar Familiar. |
| **Ideam** | Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. |
| **IDW** | Distancia Inversa Ponderada. (siglas en inglés) |
| **IEARNR** | Informe del Estado del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables. |
| **IEMS o MSDI** | Índice estandarizado multivariado de sequías. (o MSDI, por su sigla en inglés) |
| **IEP o también SPI** | Índice estandarizado de precipitación. |
| **IEUA** | Índice de eficiencia en el uso del agua. |
| **IGAC** | Instituto Geográfico Agustín Codazzi. |
| **IGME** | Instituto Geológico y Minero de España. |
| **IIAP** | Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico. |
| **IMSI** | índice multivariado de sequías integrado. |
| **IMTA** | Instituto Mexicano de Tecnologías del Agua. |
| **INAMHI** | Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador. |
| **INEA** | Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas. |
| **Ingeominas** | Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química - Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras. |
| **INS** | Instituto Nacional de Salud. |
| **IPHE** | Índice de presión hídrica a los ecosistemas. |
| **IRD** | Instituto de Investigación para el Desarrollo de la República de Francia. (IRD, por sus siglas en francés) |
| **IRH** | Índice de retención y regulación hídrica. |
| **IRS** | Índice de rendimiento medio de sedimentos. |
| **ISA** | Interconexión Eléctrica S. A. |
| **ISARM** | International Shared Aquifer Resource Management. |
| **ISH** | Índice de seguridad hídrica. |
| **IUA** | Índice de uso del agua. |
| **IVH** | Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico. |
| **LAIE** | Laboratorio de Análisis de Isótopos Estables en Agua Líquida. |
| **LBA** | Línea Base Ambiental. |
| **Lidar** | Light Detection and Ranging. |
| **LMWL o RMI** | Rectas meteóricas locales. (local meteoric water line) |
| **MA** | Major Axis o eje principal. |
| **MADR** | Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. |

| | |
|---|---|
| **MADS** | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. |
| **MHC** | Modelo Hidrogeológico Conceptual. |
| **MIIG** | Motor de Integración de Información Geocientífica. |
| **Minenergía** | Ministerio de Minas y Energía. |
| **MRE** | Ministerio de Relaciones Exteriores de Brasil. |
| **MSDI o IEMS** | Índice estandarizado multivariado de sequía. (MSDI, siglas en inglés) |
| **MVCT** | Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. |
| **NARP** | Negra, afrocolombiana, raizal, palenquera. |
| **NT** | Nitrógeno total. |
| **OD** | Oxígeno disuelto. |
| **ODS** | Objetivos de Desarrollo Sostenible. |
| **OHD** | Oferta hídrica disponible. |
| **OHTS** | Oferta hídrica total superficial. |
| **OIEA** | Organismo Internacional de Energía Atómica. |
| **OLSR** | Regresión por mínimos cuadrados ordinario. (técnica estadística) |
| **OMM** | Organización Meteorológica Mundial. |
| **ONI** | Índice Niño Oceánico. (Oceanic Niño Index, sigla en inglés) |
| **ONU** | Organización de las Naciones Unidas. |
| **OTCA** | Organización del Tratado de Cooperación Amazónica. |
| **PCB** | Bifenilos policlorados. |
| **PCM** | Porcentaje de carbono moderno. |
| **PHI** | Programa Hidrológico Intergubernamental. (Internacional) |
| **PIRMA** | Programa Institucional Regional de Monitoreo de Cantidad y Calidad del Agua. |
| **PMAA** | Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos. |
| **PMEH** | Programa de Modelación Ecohidrológica. |
| **PMIAS** | Plan de Manejo Integral de Aguas Subterráneas. |
| **PNASUB** | Programa Nacional de Aguas Subterráneas. |
| **PNMRH** | Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico. |
| **PNUD** | Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. |
| **PNUMA** | Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. |
| **POMCAS** | Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas. |
| **PPII** | Proyectos Piloto de Investigación Integral. |
| **PSH** | Plan de Seguridad Hídrica. |
| **PT** | Fósforo total. |
| **PTAR** | Plantas de tratamiento de aguas residuales. |
| **PWLSR** | Mínimos cuadrados ponderados por cantidad de lluvia. (sigla en inglés) |
| **QNIP** | Red Quindiana de Isótopos en la Precipitación. |
| **RAP-E** | Región Administrativa y de Planeación Especial. |
| **RCP** | Trayectoria de concentración representativa. (siglas en inglés) |
| **REC** | Reporte de estratificación y cobertura. |
| **RIEA** | Recomendaciones Internacionales para las Estadísticas del Agua. |
| **RMA** | Eje principal reducido. (Ranged Major Axis) |
| **RMI o LMWL** | Rectas meteóricas locales. |
| **RNI** | Red Nacional de Isotopía. |
| **RUA** | Registro Único Ambiental. |
| **RURH** | Registro de Usuarios del Recurso Hídrico. |
| **RUPS** | Registro Único de Prestadores de Servicio. |
| **SDA** | Secretaria Distrital de Ambiente. |
| **SDT** | Sólidos disueltos totales. |

| | |
|---|---|
| **SEPEC** | Sistema de Información del Servicio Estadístico Pesquero Colombiano. |
| **SGC** | Servicio Geológico Colombiano. |
| **SHI** | Servicios Hidrogeológicos Integrales S. A. S. |
| **SIA** | Sistema de Información Ambiental. |
| **SIG** | Sistema de Información Geográfica. (SIG) |
| **SIMCI** | Sistema Integrado de Monitoreo de Cultivos Ilícitos. |
| **SIMMA** | Sistema de Información de Movimientos en Masa. |
| **SINA** | Sistema Nacional Ambiental. |
| **SIRH** | Sistema de Información del Recurso Hídrico. |
| **SPI** | Índice estandarizado de precipitación. (sigla en inglés) |
| **SRTM** | Shuttle Radar Topography Mission. |
| **SSPD** | Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. |
| **SST** | Sólidos suspendidos totales. |
| **ST** | Sólidos totales. |
| **SUI** | Sistema Único de Información. |
| **SZH** | Subzona hidrográfica. |
| **TSIP** | Toxic Sites Identification Program. |
| **TUA** | Tasa por utilización de agua. |
| **TZPI** | Transformación de zonas potencialmente inundables. |
| **UdeA** | Universidad de Antioquia. |
| **UIS** | Universidad Industrial de Santander. |
| **UNDRR** | Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres. |
| **UNECE** | Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa. (sigla en inglés) |
| **Unesco** | Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. |
| **UNGRD** | Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. |
| **UNODC** | Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito. |
| **UPA** | Unidad Productora Agropecuaria. |
| **UPME** | Unidad de Planeación Minero-Energética. |
| **UPRA** | Unidad de Planificación Rural Agropecuaria. |
| **UPTC** | Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. |
| **USLE** | Ecuación Universal de Pérdida de Suelos. (por sus siglas en inglés) |
| **UTP** | Universidad Tecnológica de Pereira. |
| **VEO** | Vigilancia epidemiológica de plaguicidas organofosforados y carbamatos. |
| **VMM** | Valle Medio del Magdalena. (cuenca del) |
| **VOH** | Variabilidad de la oferta hídrica natural. |
| **VRH** | Variabilidad del recurso hídrico. |
| **VSMOW** | Vienna Standard Mean Ocean Water. |
| **WMO o OMM** | Organización Meteorológica Mundial. (sigla en inglés) |
| **YNC** | Yacimientos no convencionales. |
| **ZCIT** | Zona de convergencia intertropical. |
| **Zifec** | Zona de integración fronteriza Ecuador-Colombia. |
| **ZPI** | Zonas potencialmente inundables. (por zona hidrográfica). |



Crédito:
Diego Gonzalez
Prado, Tolima

# CONTEXTO GEOGRÁFICO Y SOCIOECONÓMICO NACIONAL

**Autores:**

**IDEAM:**
Nelson Omar Vargas Martínez
Lina Johanna Garzón Riveros

**CTA/GSI/HH:**
Consuelo Helena Onofre Encinales

CAPÍTULO 1

# 1. Contexto geográfico y socioeconómico nacional

En este capítulo, se presenta un esbozo geográfico y socioeconómico del país con el único propósito de contextualizar el ENA 2022 en estas áreas de utilidad que vinculan los temas del agua con realidades espaciales y estadísticas de relevancia para los contenidos subsiguientes.

## 1.1 Contexto geográfico

Colombia, cuyo nombre oficial es República de Colombia, es un país ubicado en la zona noroccidental de América del Sur; su capital es Bogotá D. C. Tiene una superficie de 2.070.408 km$^2$, de los cuales 1.141.748 km$^2$ corresponden al territorio continental y los restantes 928.660 km$^2$ a su extensión marítima. Es el cuarto país en extensión territorial en América del Sur y el tercero en población en América Latina, después de Brasil y México. Colombia es el único país de América del Sur que tiene costas en el océano Pacífico y en el mar Caribe, donde se encuentran diversas islas que hacen parte del país como el archipiélago de San Andrés y Providencia (Ministerio de Relaciones Exteriores, 2023) (Universidad EAFIT, 2021).

Colombia limita al este con Venezuela y Brasil, al sur con Perú y Ecuador, y al noroeste con Panamá; en cuanto a límites marítimos, colinda con Panamá, Costa Rica, Nicaragua, Honduras, Jamaica, Haití, República Dominicana y Venezuela en el mar Caribe; y con Panamá, Costa Rica y Ecuador en el océano Pacífico. La frontera colombiana está conformada por 13 departamentos: 12 terrestres y uno insular. Por orden alfabético, dichos departamentos son: Amazonas, Arauca, Boyacá, Chocó, Cesar, La Guajira, Guainía, Nariño, Norte de Santander, Putumayo, Vaupés, Vichada, y el insular Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (Figura 1).

### 1.1.1 Descripción topográfica

El territorio continental colombiano está constituido en un 33 % por montañas y un 67 % por llanuras bajas. Dentro de su topografía se pueden distinguir tres sectores principales: sistema montañoso y valles interandinos; zonas bajas; sistemas montañosos aislados, y zonas insulares (Figura 2).

#### 1.1.1.1 Sistema montañoso

En este aparte se describirá de manera sucinta el relieve del sistema andino que está conformado por las cordilleras Central, Occidental y Oriental, y sus valles interandinos.

##### Sistema montañoso andino

El sistema montañoso andino corresponde a la cadena de los Andes, que entra a Colombia a la altura del nudo de los Pastos donde conforma las altiplanicies de Ipiales, Túquerres y Pasto, así como los volcanes de Cumbal, Azufral y Galeras. En el nudo de los Pastos se desprenden la cordillera Occidental y la Central, separadas por los ríos Guáitara y Patía. Más al norte se forma el Macizo Colombiano, donde se desprende la cordillera Oriental de la Central; allí se destacan los volcanes de Sotará y el complejo de los Coconucos, entre otros. El Macizo Colombiano es una estrella fluvial donde nacen los ríos Cauca, Magdalena, Caquetá y Patía.

La *cordillera Occidental* se extiende unos 1200 km hasta el nudo de Paramillo, donde se forman las serranías de Abibe, San Jerónimo y Ayapel. En su costado occidental se destaca la llanura del Pacífico y al este se encuentra el valle del río Cauca. Atraviesa los departamentos de Nariño, Cauca, Valle del Cauca, Risaralda y Antioquia. La parte occidental de esta cordillera pertenece, principalmente, a la vertiente del Pacífico, en la que destaca el río San Juan; mientras que la vertiente oriental pertenece a la cuenca del río Cauca. La parte norte y noroccidental pertenecen a la vertiente atlántica, donde se destacan los ríos Atrato y Sinú (Alvarez, 1983). La cordillera Occidental tiene un relieve menos pronunciado que la Central, alcanzando alturas máximas de 4280 m s. n. m. Al sur, presenta varios volcanes pliocuaternarios que son la prolongación meridional de la cadena que existe en la cordillera Central y que luego continúa hacia el Ecuador.

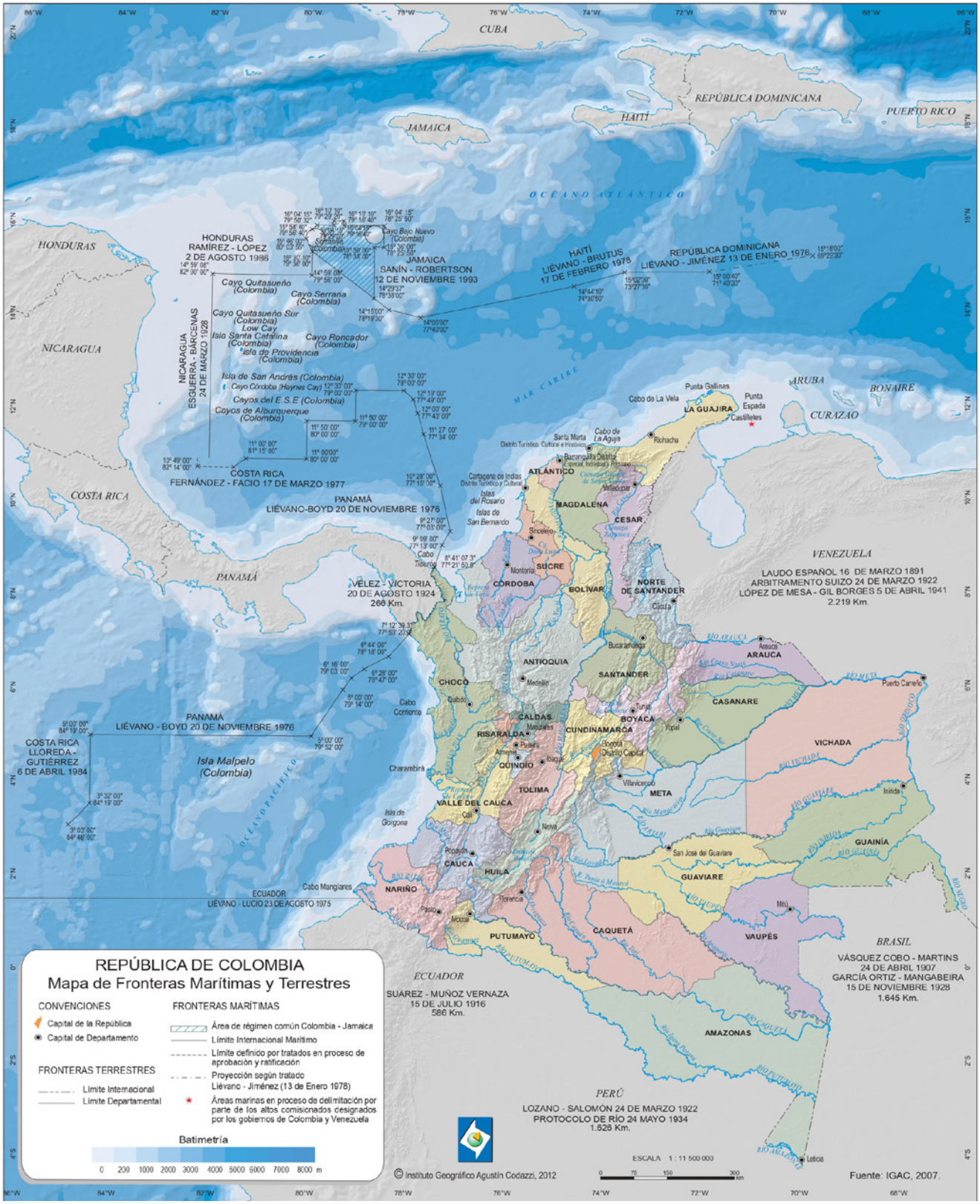



Figura 1. Fronteras terrestres y marítimas de Colombia (IGAC, 2005).

Los terrenos de la cordillera Occidental están drenados por el río Cauca y sus tributarios occidentales, además de los ríos que vierten sus aguas al océano Pacífico y al río Atrato que desemboca en el mar Caribe. A causa de la alta pluviosidad que caracteriza a la costa Pacífica colombiana (3000-9000 mm/año) en el flanco occidental de la cordillera Occidental, los ríos son muy caudalosos a pesar de tener un recorrido relativamente corto. La vegetación es selvática en la mayor parte del área. Las llanuras de la costa Pacífica —que se extienden al norte por los valles de los ríos San Juan y Atrato, y se prolongan al sur hasta el puerto de Tumaco para continuar hacia Ecuador— constituyen la Depresión del Atrato-San Juan-Tumaco, que separa la cordillera Occidental de la serranía de Baudó. Están formadas por tierras bajas en parte pantanosas y con densa vegetación bordeando el océano Pacífico y continuando hacia Panamá. El relieve es bajo y solo en pocas áreas sobrepasa los 500 m alcanzando hasta 1810 m. La vegetación y pluviosidad es similar a la de la vertiente oeste de la cordillera Occidental, con excepción de algunos sectores a lo largo de la Depresión del Cauca-Patía y del pie oriental de la cordillera (Alvarez, 1983).

La *cordillera Central* tiene un núcleo ígneo-metamórfico y se extiende desde el nudo de los Pastos hasta las llanuras del Caribe, con promedio de 3000 m s. n. m. e importantes estructuras volcánicas, como los nevados del Ruíz, Huila y Santa Isabel. Atraviesa los departamentos de Nariño, Huila, Cauca, Valle del Cauca, Quindío, Tolima, Caldas, Risaralda, Antioquia (donde forma el macizo antioqueño) y Bolívar. Está bordeada por los valles del río Cauca, al occidente, y del río Magdalena, al oriente. La cordillera Central es la más alta de las cordilleras colombianas y está coronada por estructuras volcánicas que alcanzan alturas de hasta 5750 m s. n. m. Se extiende en sentido general sur-norte hasta la latitud 8° 30' N, y desaparece bajo los depósitos terciarios y cuaternarios que definen las planicies onduladas en las zonas bajas de los ríos Cauca y Magdalena. La topografía de la cordillera es abrupta y profundamente disectada por las tributarias de dichos ríos. Las redes hidrográficas modelan el relieve; se puede notar que los afluentes orientales del río Cauca son de recorrido más corto y menos caudalosos que los occidentales del río Magdalena. Las precipitaciones son variables, pero suelen fluctuar entre 2000 y 3000 mm al año. En la cordillera Central se presentan la mayoría de los volcanes que en la actualidad están activos o durmientes cuyos espesos depósitos volcánicos fosilizan la paleotopografía en varios lugares (Alvarez, 1983).

La *cordillera Oriental,* de naturaleza sedimentaria de manera primordial, es la más larga de las cordilleras y se extiende hasta territorio venezolano. En su recorrido, la cordillera atraviesa territorio de los departamentos de Cauca, Caquetá, Huila, Tolima, Meta, Cundinamarca, Boyacá, Santander, Norte de Santander, Cesar y La Guajira. Se inicia en el Macizo Colombiano y se divide en el extremo norte, en el nudo de Santurbán, donde da origen a la cordillera de Mérida (Venezuela) y a las serranías de los Motilones y del Perijá, en Colombia (Chicangana y Kammer, 2013).

### Valles interandinos

Los valles interandinos son depresiones tectónicas que separan las cordilleras. En Colombia, los valles interandinos son cuencas estructurales entre las cordilleras y no solo el producto de la erosión fluvial.

El valle del río Magdalena se localiza entre las cordilleras Central y Oriental. Posee una extensión de 200.000 km² y es considerado el valle más importante de Colombia. Se extiende desde el nacimiento del río, al sur del departamento del Huila, hasta su desembocadura en las Bocas de Ceniza en el mar Caribe.

El valle del río Cauca separa las cordilleras Occidental y Central. Cuenta con una extensión aproximada de 85.000 km² y culmina al norte del país, en el lugar donde se une al río Magdalena.

El valle del río Atrato está ubicado entre la cordillera occidental y la serranía del Pacífico, ocupando una superficie de 35.000 km². El valle del Atrato es angosto en el sur y amplio en el norte, con alrededor de 10 km y 30 km, respectivamente. Se caracteriza por las ciénagas y los caños que forman el río y sus afluentes en la mayor parte de su curso hasta la desembocadura.




Figura 2. Mapa del relieve de Colombia (IGAC, 2005).

### 1.1.1.2 Zonas bajas

Estas zonas se ubican en la franja oriental, en las regiones de Orinoquía y Amazonía, así como también, en las llanuras de las costas pacífica y Caribe, al occidente y norte del país, respectivamente.

#### Orinoquía

Hace parte de los llamados *Llanos Orientales,* con una extensión de 250.000 km$^2$. Sus planicies están localizadas al este de la cordillera Oriental, formando parte de la cuenca del Orinoco. Presenta una vegetación de sabana y bosque, con tierras dedicadas a la ganadería y a la explotación de minerales. Su longitud comprende territorios de los departamentos de Arauca, Casanare, Meta, Guaviare, Vichada y Guainía (Vásquez Cerón et al., 2019).

#### Amazonía

Se sitúa entre el río Guaviare, el río Amazonas, la cordillera Oriental y Brasil. Cuenta con una superficie de 380.000 km$^2$, en donde predomina la selva tropical húmeda; por tanto posee numerosos ríos.

Es una de las regiones más ricas del planeta en biodiversidad, tanto en flora como en fauna y, a su vez, cuenta con depósitos de minerales como carbón, oro y petróleo. Su extensión comprende territorios de los departamentos de Putumayo, Caquetá, Guaviare, Guainía, Vaupés y Amazonas. La Amazonía colombiana presenta una alta pluviosidad, lo cual contribuye a mantener importantes funciones ecosistémicas, como la de regulación climática a nivel regional y global, aportando para la adaptación al cambio climático. Su importancia hidrográfica se deriva de su posición en el extremo noroccidental de la Gran Cuenca, en donde nacen: el mayor afluente del río Orinoco (río Guaviare), dos de los mayores afluentes septentrionales del río Amazonas (ríos Caquetá y Putumayo) y las cabeceras occidentales del río Negro (río Guainía, río Isana y río Vaupés). Entre los afluentes del Caquetá es importante tener en cuenta los ríos Orteguaza, Caguán, Yarí y Apaporis, cada uno con varios tributarios. Y entre los que vierten sus aguas al Putumayo (río que sirve de límite con el Perú) cabe citar el río Cotuhé, que desemboca por su margen derecha en tierras del trapecio amazónico.

La Amazonía es una región con una gran relevancia geopolítica nacional e internacional debido a la presencia de recursos estratégicos, a su importancia ambiental y ecológica, a su patrimonio cultural y a su condición de región transfronteriza. Para nuestro caso, representa el límite con cuatro de los cinco países con los cuales Colombia comparte fronteras: Venezuela, Brasil, Perú y Ecuador. La entidad de cooperación regional para adelantar procesos políticos en el territorio amazónico es la Organización del Tratado de Cooperación Amazónica (OTCA). El Tratado se firmó en 1978 con el propósito de coordinar esfuerzos para proteger la cuenca y promover su desarrollo. El acuerdo tiene varias particularidades: vincula países para coordinar acciones sobre una región definida ecológicamente y, si bien el convenio se firmó antes del *boom* de la discusión ambiental a gran escala, expresa un fuerte compromiso con la conservación de la riqueza ecológica amazónica. El Tratado le apuesta al uso «racional» de los ríos y la fauna, a promover la cooperación científica, la integración física y a asegurar la preservación de las riquezas ecológicas y otras acciones similares; además, en el Tratado se advierte que esos usos están bajo la soberanía nacional en forma exclusiva (Guio y Rojas, 2019).

#### Llanura del Pacífico

El Pacífico colombiano es una unidad geográfica y una región natural que abarca los territorios de cuatro departamentos: Chocó, Valle del Cauca (Buenaventura), Cauca y Nariño. Tiene un área de 83.170 km$^2$ que se extiende desde el golfo de Urabá y la frontera con Panamá, al norte, hasta la frontera con Ecuador al sur. Limita al oriente con la cordillera Occidental y al occidente con el litoral Pacífico. Es una zona poco apta para la actividad agrícola, pero cuenta con una inmensa variedad de especies vegetales y animales.

Su territorio comparte unas características similares: vegetación selvática y cuencas hidrográficas sobre valles amplios e inundables y algunas veces pantanosos, donde sobresalen la serranía de Baudó, en el departamento del Chocó, y la cordillera de los Andes en los departamentos de Cauca y Nariño. La región está localizada al occidente de Colombia, sobre una superficie superior a los 116.000 km$^2$. Hay

cuatro elementos notables en el medio ambiente que caracterizan al Pacífico colombiano: (1) La presencia del mar, que no es solo el océano Pacífico, sino su variabilidad climática. (2) El relieve andino, que no es solo la cordillera Occidental, sino la dificultad que esta impone en la comunicación con otras regiones. (3) La riqueza hidrográfica por ríos y cuerpos de agua que, más allá de la explotación artesanal del oro, no se traduce en una fuente de riqueza, y solo medianamente resuelve el problema de comunicación al interior de la región. (4) El clima, la condición de humedad y la precipitación excesiva, una de las más altas del mundo, desafían las condiciones de vida de sus habitantes (Romero, 2009).

### Llanura del Caribe

Tiene una superficie de 142.000 km²; abarca desde las estribaciones de las tres cordilleras hasta el litoral Atlántico, constituyendo un 8,7 % del territorio nacional. Cuenta con extensas zonas agrícolas y ganaderas. La población se concentra en la costa y abarca territorios de los departamentos de Antioquia, Córdoba, Sucre, Bolívar, Magdalena, Cesar y La Guajira.

Comprende sabanas ubicadas en los departamentos de Sucre y Córdoba, aptas para la ganadería; las planicies del norte, que incluye los valles fértiles formados por los ríos Sinú y San Jorge, que hacia la zona occidental se vuelve más húmeda y con pastos; y la zona oriental seca que se caracteriza por poseer el desierto de La Guajira, con una preponderancia de temperaturas altas y escasa vegetación, y un sistema montañoso en su parte septentrional que conforma la serranía de Macuira, la que en el cerro Palúa alcanza los 864 m s. n. m. Además, en la afluencia de los ríos Magdalena y Cauca se encuentra la Depresión Momposina que alberga cientos de pantanos, ciénagas y lagunas.

## 1.1.1.3 Sistemas montañosos aislados

Fuera del gran sistema montañoso de los Andes, existen en Colombia otros núcleos montañosos independientes como la serranía de Baudó, en el departamento del Chocó; la serranía del Darién, que sirve de límite entre las repúblicas de Colombia y Panamá, en el sector noroccidental del departamento del Chocó; los Montes de María o serranía de San Jacinto, ubicados en la región Caribe de Colombia que son una prolongación de la cordillera Occidental (sobre ellos se encuentran asentados los municipios de San Jacinto, El Carmen de Bolívar, Marialabaja, San Juan de Nepomuceno y Zambrano, en el departamento de Bolívar; así como los municipios de Ovejas, Chalán, Coloso y Palmitos, en el departamento de Sucre); la Sierra Nevada de Santa Marta; las serranías de Jarara y Macuira, en La Guajira, y la Sierra de la Macarena.

La *Sierra Nevada de Santa Marta* se localiza a unos cuantos kilómetros del mar Caribe, entre escarpes y filos pronunciados que forman una pirámide casi perfecta, donde se levantan los glaciares de la Sierra Nevada de Santa Marta, el macizo litoral más alto del mundo. Estas montañas glaciadas, las más septentrionales del territorio colombiano y de Suramérica, están separadas de la gran cordillera de los Andes y son el corazón mismo del territorio de cuatro pueblos indígenas: kogui, arhuaco, wiwa y kankuamo; y están incluidas en el resguardo Kogui-Malayo-Arhuaco. La Sierra Nevada de Santa Marta se localiza entre los departamentos de Magdalena, La Guajira y Cesar, y abarca una superficie de 17.000 m². El flanco norte bordea el mar Caribe, desde las tierras planas y áridas del sur de la península de La Guajira hasta los alrededores de la ciudad de Santa Marta, en la desembocadura del río Manzanares. El flanco occidental limita con el mar Caribe, la Ciénaga Grande de Santa Marta y la planicie aluvial del río Magdalena, desde la desembocadura del río Manzanares hasta la población de Bosconia, en el departamento del Cesar. Por último, el flanco oriental está enmarcado por los valles de los ríos Cesar, al sur, y Ranchería, al norte, entre Bosconia (departamento del Cesar) y la población de Cuestecitas, en el departamento de La Guajira. En la Sierra Nevada se encuentran los picos más elevados del territorio colombiano: los picos gemelos de Cristóbal Colón y de Simón Bolívar, con 5750 m s. n. m. cada uno. A su vez, en esta región se localizan numerosos lagos de origen glaciar en alturas superiores a los 3000 m, a partir de los cuales se forman los ríos que descienden por las tres grandes vertientes de la sierra (Ideam, 2017).

La *serranía de la Macarena* ocupa un espacio biogeográfico en las cuencas hidrográficas de los ríos

Guayabero y Ariari; esta ubicación, aunada a la confluencia de los ecosistemas amazónico, andino y orinocense en su territorio, explica la razón de su importancia ecológica; pero además, y como elemento histórico, integra variadas connotaciones geológicas en lo que parece ser el límite occidental del escudo de La Guyana, lo que la determina como sistema geográfico natural, una significación de especial importancia. Sus rocas —constituidas por esquistos micáceos, anfibolitas y ortogneis, en parte granosieníticos— datan del Precámbrico, y su levantamiento fue independiente y probablemente anterior al de la cordillera de los Andes, puesto que, en los sectores planos y bajos, las rocas arcaicas están cubiertas por sedimentos provenientes de la cordillera. La Sierra de la Macarena es una formación montañosa aislada de la cordillera andina, de relieve escarpado y forma alargada en sentido norte-sur, que mide 125 km de longitud por 35 km en su parte más ancha; y tiene alturas que casi alcanzan los 2200 m s. n. m. (Zarate, 2018).

La *serranía del Perijá* es el ramal más septentrional de la cordillera de los Andes. También se conoce, sobre todo en su zona sur, como serranía de los Motilones, e incluye otros sistemas montañosos como la serranía de Valledupar y los montes de Oca. Marca la frontera entre Colombia y Venezuela, con los departamentos colombianos de Norte de Santander y La Guajira, al oeste, y el estado venezolano del Zulia, al este. La vertiente oriental pertenece a la cuenca del lago de Maracaibo, y en esta se destaca el río Catatumbo. La vertiente occidental corresponde, principalmente, a la cuenca del río Cesar (afluente del Magdalena) y el río Ranchería, que desemboca en el mar Caribe.

#### 1.1.1.4 Zona insular

Colombia cuenta con alrededor de 3531 km de costa en el océano Pacífico y el mar Caribe, que le otorgan otros 892.102 km$^2$ de aguas jurisdiccionales, según el mapa en *Ecosistemas continentales, costeros y marinos* (Ideam et al., 2007) para una extensión total aproximada de 2.070.408 km$^2$. Es así como Colombia tiene un área jurisdiccional marítima relativamente igual a la de su territorio emergido (continental e insular), y de ahí el origen del lema institucional del Invemar: «Colombia, 50 % mar».
La costa Caribe insular oceánica está conformada por el archipiélago de San Andrés, Providencia, Santa Catalina y sus islotes y cayos asociados; se ubica al noroeste del país, en la llamada zona de elevación de Nicaragua, entre las coordenadas 10° 49' y 16° 10' de latitud norte y 78° 00' y 82° 14' de longitud oeste. Tiene una extensión de línea de costa de unos 60 km y un área terrestre de 49 km$^2$. La costa del Pacífico insular está conformada por la isla de Gorgona, en el margen continental, y la isla Malpelo, en el sector oceánico. Tienen una longitud total de línea de costa de 25 km y 4 km, respectivamente; y un relieve montañoso y escarpado, con abundante vegetación tropical para Gorgona y suelos desnudos en Malpelo. (Invemar, 2015)

### 1.1.2 Hidrografía de Colombia y zonificación hidrográfica

Gracias a la ubicación geográfica, la diversidad de relieve y la gran variedad de climas que posee, Colombia es uno de los países que cuenta con mayor riqueza hídrica en el mundo. La disponibilidad de agua en el país se ve reflejada en el sinnúmero de recursos hídricos con los que cuenta, los cuales se distribuyen por toda su superficie terrestre. Colombia se encuentra privilegiada al estar limitada por dos océanos, el Pacífico y el Atlántico; en el segundo se delimita el mar Caribe (MAVDT, 2010).

La abundancia de Colombia también se refleja en que ocupa los primeros puestos entre los países con mayores fuentes hídricas en el mundo, con un valor de escorrentía que equivale a un volumen de 1963 km$^3$ de agua por año, valor que (en términos de rendimiento promedio) es de 56,2 l/s/km$^2$, mientras que el promedio mundial es de apenas 10 l/s/km$^2$, y el promedio latinoamericano es de 21 l/s/km$^2$ (Ideam, 2019).

El territorio se divide en áreas hidrográficas que corresponden a las regiones hidrográficas o vertientes que, en sentido estricto, son las grandes cuencas que agrupan un conjunto de ríos con sus afluentes que desembocan en un mismo mar. Estas áreas hidrográficas corresponden al área hidrográfica del Orinoco, área hidrográfica del Amazonas, área hidrográfica del Caribe y, se delimita adicionalmente, el área hidrográfica de la cuenca Magdalena-Cauca que, aunque tributa y forma parte de la vertiente Caribe, tiene importancia socioeconómica por su alto poblamiento y aporte al producto interno bruto

(Figura 3). Las cinco áreas hidrográficas se dividen en 41 zonas y 316 subzonas hidrográficas (Ideam, 2013, modificado en 2022).

El Ideam cuenta con la versión de «Zonificación hidrográfica de Colombia a escala 1:500.000» actualizada al 2013 y esta información fue utilizada hasta el ENA 2018. Para el ENA 2022, en la Subdirección de Hidrología se actualizó la zonificación a escala 1:100.000 con base en la actualización cartografía básica del IGAC. De acuerdo con la información sobre cuencas hidrográficas a diferentes niveles suministrada por HydroSHEDS[1], se realizó la verificación y el ajuste topológico de la información; y terminado este proceso, se identificaron y codificaron las cuencas según la estructura establecida por el Ideam. Al final, se editaron los cierres de las cuencas en la desembocadura del río y los cruces de las divisorias de aguas.

En la nueva zonificación, se mantiene la misma cantidad de áreas, zonas y subzonas hidrográficas. Los principales cambios fueron:

- Los códigos de las subzonas no cambiaron, pero en algunos casos cambió el nombre con base en la cartografía básica 1:100.000.
- La subzona Río Guarrojo (3302) disminuyó 34 % y aumentó Directos Vichada Medio (3305) 19 %.
- La subzona Bajo río Guainía (4105) se llevó a la desembocadura en el río Negro; con esto, el área disminuye 9 %.
- Con el cambio anterior, la subzona Directos río Negro (md) (4107) disminuye un 50 % y aumenta Medio río Guainía (4102) un 44 %.
- Esta zonificación constituye la base de unidades de análisis para el ENA 2022; además, de soportar los planes estratégicos de macrocuenca y los POMCAS que formulan las autoridades ambientales.

A continuación, se describen las principales características de las áreas hidrográficas:

La vertiente del Orinoco corresponde al área hidrográfica del Orinoco, que tiene una extensión de 345.318 km$^2$ y abarca las zonas hidrográficas de Inírida, Guaviare, Vichada, Tomo, Meta, Casanare, Arauca, Apure y Orinoco directos. Se caracteriza por ser un sistema hidrográfico que nace en la cordillera Oriental y desagua hacia el Orinoco, en dirección occidente-oriente. Entre sus principales ríos cabe resaltar: el río Orinoco, que nace en los límites entre Venezuela y Brasil a una altura de 1000 metros y posee una longitud aproximada de 2500 km. El Meta, que nace en la cara oriental de la cordillera Oriental y desemboca en el río Orinoco, siendo de gran importancia como medio de transporte. El río Arauca, que nace en el páramo del Almorzadero, en los límites de los departamentos de Santander y Norte de Santander, recorriendo varios municipios, desde Norte de Santander, Boyacá y Arauca, para luego convertirse en límite natural con Venezuela (Viloria de la Hoz, 2009).

En el área hidrográfica del río Amazonas en Colombia —con un área de drenaje de 341.606 km$^2$, equivalente al 5 % de la Gran Cuenca Amazónica y cerca del 42 % del país—, se destacan por su participación en el territorio colombiano las zonas hidrográficas de los ríos Putumayo, Caquetá, Caguán, Yari, Apaporis y Napo, nacidos en la cordillera Oriental o en el piedemonte; además, de los ríos Vaupés y Guainía (Negro), ya nacidos en las llanuras. Mientras que el primer grupo de ríos se caracteriza por las aguas claras, aquellos nacidos en la llanura tienden a tener aguas más turbias. El río Amazonas también hace parte de la Amazonía colombiana en una participación mínima, debido a que es límite fronterizo en un recorrido de alrededor de 116 km (Meisel et al., 2013). Hacen parte de la Amazonía la totalidad del territorio de los departamentos de Putumayo, Caquetá, Amazonas, Vaupés, Guaviare y Guainía, 4,2 % del departamento del Meta, 14 % del departamento del Cauca y 7 % de Nariño.

El área hidrográfica del Caribe, con una extensión de 102.679 km$^2$, se encuentra conformada por seis zonas hidrográficas entre las que se encuentran: Atrato-Darién, Sinú, Catatumbo, Caribe-litoral, Caribe-La Guajira e islas Caribe (Ideam, 2013, modificado en 2022). Está conformada por 42 subzonas hidrográficas, de las cuales 34 están ubicadas: una parte, frente al mar Caribe, entre la frontera con Panamá al occidente (departamento del Chocó) hasta la península de La Guajira al oriente; y las restantes ocho subzonas están ubicadas en la frontera con Venezuela, en el departamento de Norte de Santander. El Caribe insular comprende las islas de San Andrés, Providencia, Santa Catalina y cayos.

[1]HydroSHEDS: Hydrological data and maps base don Shuttle Elevation Derivatives at multiple Scales.

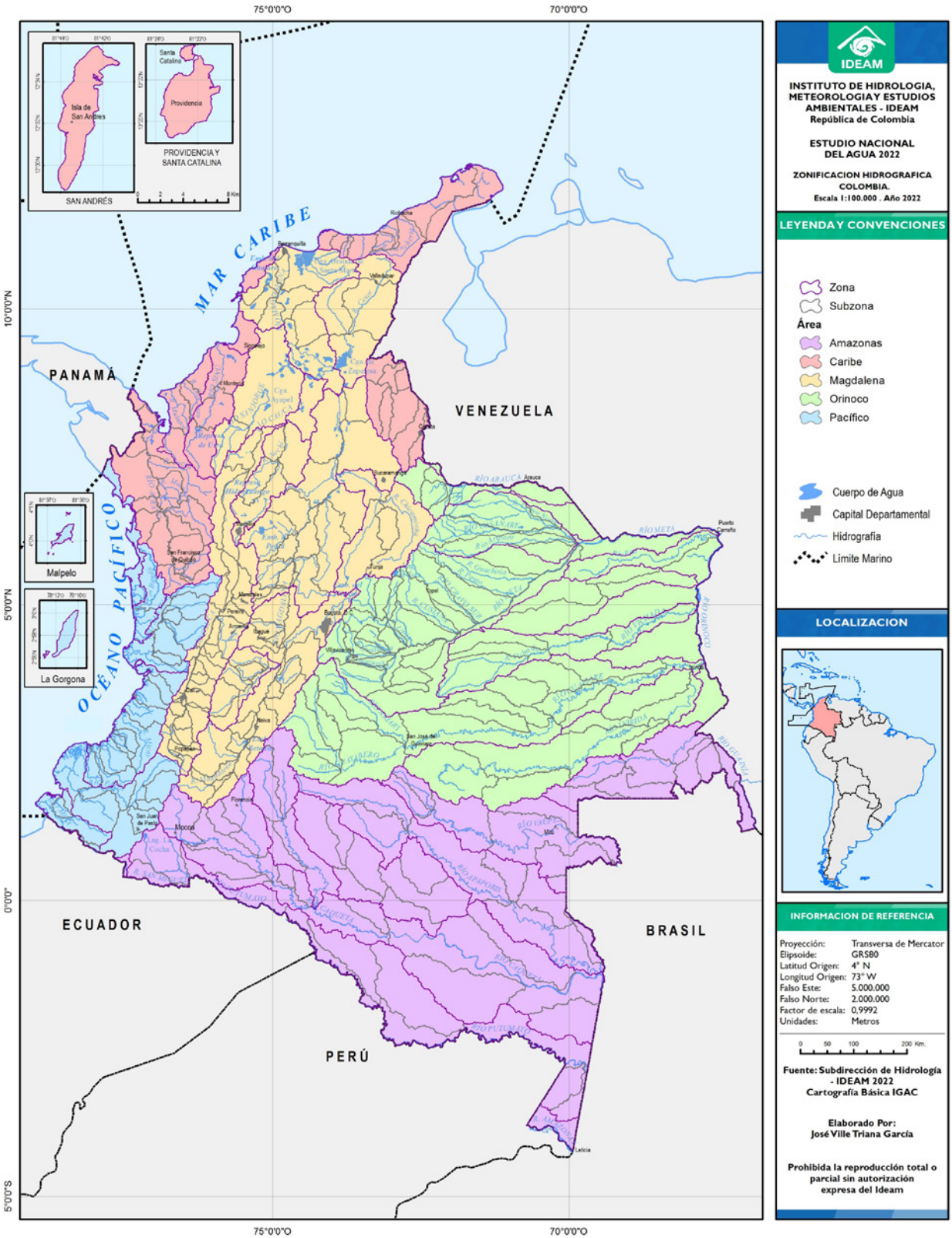



Figura 3. Mapa de la zonificación hidrográfica de Colombia (Ideam, 2013, modificado en 2022).

Esta área hidrográfica del Caribe comprende diferentes ríos, entre los cuales están: el río Atrato, que es uno de los más caudalosos (4900 m³/s) y corre en todos su curso, de sur a norte, hacia las costas del Pacífico para desembocar en el golfo de Urabá, en el mar Caribe. El río Sinú, que tiene cerca de 438 km de longitud; su nacimiento está en el nudo de Paramillo, ubicado entre los departamentos de Córdoba y Antioquia, y desemboca en la bahía de Cispatá, en el golfo de Morrosquillo (Lasso et al., 2011). Y el río Ranchería, que nace en la Sierra Nevada de Santa Marta, en el páramo de Chirigua, a una altitud de 3875 m s.n.m., y luego de un recorrido aproximado de 248 km desemboca en el mar Caribe (Otero Cortés, 2013).

El área hidrográfica del Pacífico corresponde a la vertiente del Pacífico, con una extensión de 77.333 km$^2$; comprende las zonas hidrográficas de Mira, Patía, Tapaje-Dagua directos, San Juan, Baudó-directos Pacífico, Pacífico-directos e Islas del Pacífico. Está formada por más de 200 ríos cortos y caudalosos debido a la presencia, en su extremo oriental, de la cordillera Occidental y de las serranías del Baudó y del Pacífico, las cuales le sirven como centros hidrográficos donde nacen los ríos, así como también de barreras naturales a los vientos oceánicos que, al originar permanentes lluvias, alimentan el caudal de estos. Se destacan las hoyas del Baudó (150 km), la del San Juan (380 km), la del Mira (88 km en Colombia) y la del Patía (400 km). El río Baudó nace en la zona aledaña del llamado Alto del Buey, sobre una altura aproximada de 1200 m s.n.m., en jurisdicción del Parque Natural Nacional Ensenada de Utría (IIAP, 2013). El río San Juan tiene origen en el cerro Caramanta, en una región de abundante riqueza mineral y de niveles de humedad de los mayores del mundo; tiene 380 km de largo y desemboca en el océano Pacífico. El río Patía nace cerca al Macizo Colombiano y desemboca en el océano Pacífico, luego de bajar desde la cordillera hasta una llanura selvática de gran riqueza aurífera, completando 400 km. Y el río Mira nace en Ibarra (Ecuador), tiene una extensión navegable de 300 km y llega al Pacífico colombiano por una fértil llanura (Barrero Zabaleta, 2017).

Por último está el área hidrográfica Magdalena-Cauca, la cual tiene una superficie de 271.807 km$^2$, equivalente al 24 % del territorio colombiano y abarca las zonas hidrográficas del Alto Magdalena, Saldaña, Medio Magdalena, Sogamoso, Bajo Magdalena-Cauca-San Jorge, Cauca, Nechí, Cesar y Bajo Magdalena. La cuenca se encuentra circunscrita geográficamente entre los ejes montañosos oriental, central y occidental de la cordillera de los Andes. Se configura a partir del agregado de valles del río Magdalena, como eje principal, del río Cauca (1350 km) y del río San Jorge (368 km) como sus principales tributarios, y de otros sistemas importantes como el valle del río Cesar (29.220 km$^2$) y el sistema del río Sogamoso (24.165 km) (Lasso et al., 2011). En esta área hidrográfica se encuentran 19 departamentos que corresponden al 54 % de los departamentos del país y 728 municipios; y tienen jurisdicción 23 autoridades ambientales regionales y cuatro autoridades ambientales urbanas, además de Cormagdalena, responsable de la protección y gestión integral del río Magdalena.

En la Tabla 1, se presentan los caudales de algunos de los ríos más largos y caudalosos de Colombia.

Tabla 1. Caudales medios anuales de algunos de los ríos más largos y caudalosos de Colombia.

| Río | Longitud (km) | Caudal medio anual (m³/s) | Estación final - Ideam | Departamento | Municipio |
|---|---|---|---|---|---|
| Magdalena | 1540 | 8058 | Calamar [29037020] | Bolívar | Calamar |
| Amazonas | 116 | 41.579 | Nazareth [48017030] | Amazonas | Leticia |
| Cauca | 1350 | 2448 | Tres cruces [25027640] | Bolívar | Achí |

| Río | Longitud (km) | Caudal medio anual ($m^3/s$) | Estación final - Ideam | Departamento | Municipio |
|---|---|---|---|---|---|
| Guaviare | 947 | 7389 | Guayare [31097010] | Guainía | Inírida |
| Putumayo | 1717 | 7588 | Tarapacá [47107010] | Amazonas | Tarapacá |
| Caquetá | 1350 | 10.273 | Bacuri [44187030] | Amazonas | La Pedrera |
| Atrato | 750 | 2550 | Bellavista [11077010] | Chocó | Bojayá (Bellavista) |
| Vaupés | 1000 | 1251 | San Antonio [42077010] | Vaupés | Mitú |
| Meta | 1110 | 6614 | Aceitico [35257040] | Vichada | Puerto Carreño |
| San Juan | 380 | 2304 | Penitas [54097010] | Chocó | El litoral del San Juan (Docordó) |
| Patía | 400 | 339 | Los Nortes - Aut. [52077020] | Nariño | Cumbitara |
| Sinú | 438 | 479 | La Doctrina [13077040] | Córdoba | Lorica |

Por otra parte, la riqueza hídrica del país se manifiesta también en los diferentes cuerpos de agua lénticos que albergan grandes cantidades de agua, tales como ciénagas, embalses, lagunas y pantanos. Se ha identificado que su área equivale a 831.163,7 ha; de las cuales 397.613,7 ha corresponden a ciénagas, 51.864,3 ha a embalses, 123.412 ha son lagunas y 258.273 ha están ocupadas por pantanos (Ideam, 2015).

Ahora bien, en cuanto a ciénagas, en Colombia existen alrededor de 1900 que se encuentran distribuidas en tres regiones principales: el Bajo Magdalena (que alberga el 82 % de las ciénagas del país), el Bajo Atrato y las llanuras bajas del río Sinú (Rivera y Silva, 2015). En la cuenca baja del río Magdalena, en particular, se encuentran los grandes sistemas de ciénagas, entre los cuales se destaca la Ciénaga Grande de Santa Marta y la ciénaga de Zapatosa (Ideam, 2015).

Por otra parte, el país cuenta con alrededor de 32 grandes embalses, cuyos principales usos son: generación de energía eléctrica, abastecimiento de agua potable y riego (Romero V., 2020). Los principales embalses se encuentran en la cuenca alta del Magdalena (el embalse de Betania) y en la zona de Antioquia (embalse de Peñol-Guatapé), entre muchos otros (Ideam, 2015).

En el caso de Colombia, los lagos y las lagunas de montaña pueden ser de origen glaciar, volcánico o tectónico y se encuentran en todos los pisos térmicos; sus características ambientales, ecológicas y paisajísticas están determinadas por la altura sobre el nivel del mar. Dentro de los lagos y las lagunas de origen glaciar se destacan: la laguna de La Plaza y la laguna Grande de la Sierra, localizadas en el Parque Nacional Natural El Cocuy; la laguna Naboba, en la Sierra Nevada de Santa Marta; las lagunas del Complejo Chingaza, que surten de agua a Bogotá; la laguna de Iguaque, en Boyacá; la del Otún, en el Parque Nacional Natural Los Nevados; y la laguna de Chisacá, en el páramo de Sumapaz, entre otras. De las de origen volcánico se encuentran la Laguna Verde, en el volcán Azufral, y su homónima en el Parque Nacional Natural Los Nevados, las cuales ocupan cráteres de volcanes inactivos y reciben su nombre debido a la coloración verde de sus aguas. Y los lagos y las lagunas de origen tectónico, que se localizan principalmente en los altiplanos; entre estos podemos destacar: el lago de Tota, con 5598

hectáreas, es en la actualidad el de mayor extensión en Colombia; se localiza a 3015 m s. n. m., en jurisdicción de los municipios de Aquitania, Cuitiva, Sogamoso y Tota, en el departamento de Boyacá; y el lago de La Cocha, con 4200 hectáreas, el segundo en tamaño en Colombia, y se localiza a 2700 m s. n. m., al sur del país, en cercanías al nudo de los Pastos, en Nariño (Rivera y Silva, 2015).

Por último, en cuanto a los pantanos, sus ambientes se caracterizan por una saturación permanente de humedad, estancamiento y escasa fluidez en los horizontes superiores del suelo y del subsuelo (Ideam, 1998). La superficie total de los pantanos en Colombia es de aproximadamente el 31 % del área ocupada por cuerpos de agua lénticos; la presencia de pantanos es característica en la región de la Amazonía, en particular, en las cuencas de los ríos Vaupés y Apaporis; y en la Orinoquía, en especial en la cuenca del río Inírida (Ideam, 2015).

La zonificación hidrogeológica se define con base en los conceptos de *provincias hidrogeológicas* y sistemas acuíferos. Las provincias hidrogeológicas corresponden a unidades mayores referidas a escalas menores, delimitadas con base en unidades tectonoestratigráficas; estas se encuentran separadas entre sí por rasgos estructurales regionales que coinciden con cuencas geológicas mayores que desde el punto de vista hidrogeológico corresponden a barreras impermeables, representadas por fallas regionales y altos estructurales (Ideam, 2010), (Ideam, 2013), (Ideam, 2013, modificado en 2022). Y por otra parte, están los *sistemas acuíferos* que pueden constituir una fuente de recursos de ámbito regional (OMM, 2012); son dominios espaciales, limitados en superficie y en profundidad, en los que existen uno o varios acuíferos relacionados o no entre sí, pero que constituyen una unidad práctica para la investigación o la explotación. (IGME, 1987). De esta manera, se definieron 12 provincias hidrogeológicas entre costeras, intramontanas y pericratónicas (estas últimas, en la Orinoquía y la Amazonía colombiana), en las cuales se han caracterizado 66 sistemas acuíferos cuyas fichas y representaciones espaciales se presentan en el capítulo 4 y anexos asociados. Asimismo, en el capítulo 3 se presentan los glaciares de Colombia, que constituyen patrimonio hídrico nacional junto con los sistemas lénticos ya mencionados.

### 1.1.3 Cuencas hidrográficas y acuíferos transfronterizos

Colombia comparte cuencas transfronterizas en las áreas hidrográficas Caribe, Orinoco, Pacífico y Amazonas. Hay 23 zonas hidrográficas transfronterizas y cerca de 50 subzonas (Figura 4) en los departamentos de Nariño y Putumayo (con Ecuador), Amazonas (con Perú y Brasil), Vaupés (con Brasil), Guainía, Vichada, Arauca, Norte de Santander, Cesar y La Guajira (con Venezuela) y Chocó (con Panamá). En total, se comparten 266.450 km$^2$ de subzonas hidrográficas transfronterizas.

Por otro lado, está la iniciativa regional para el hemisferio americano, el Programa Unesco/OEA ISARM Américas, una iniciativa hemisférica bajo la coordinación conjunta de la Unesco a través del Programa Hidrológico Internacional (PHI) y la Organización de los Estados Americanos (OEA). En el marco del programa ISARM (International Shared Aquifer Resource Management), en 2016 se presenta el «estado actual» del conocimiento de los recursos hídricos subterráneos transfronterizos en las Américas a una escala regional y también los vacíos de conocimiento encontrados, algunos de los cuales serán subsanados en el futuro (Unesco, 2017). En la Figura 5, se comparten los sistemas acuíferos transfronterizos de Suramérica.

Tal como se observa, Colombia comparte cinco sistemas acuíferos 1S Chocó-Darién, 2S Táchira-Pamplonita, 3S La Guajira, 10S Tulcán-Ipiales y 13 S Amazonas. En territorio colombiano, se han caracterizado los sistemas acuíferos de Táchira-Pamplonita y de La Guajira, y se tienen algunos conocimientos del sistema acuífero del Amazonas en Leticia.

### 1.1.4 Balance hídrico nacional

Por último, en la Figura 6 se ilustra un *balance hídrico nacional* que da cuenta del patrimonio natural representado por las generosas condiciones de precipitación, evapotranspiración y escorrentía, y el uso que se hace para satisfacer las necesidades sectoriales, incluidos el consumo humano y el agua de exportación.

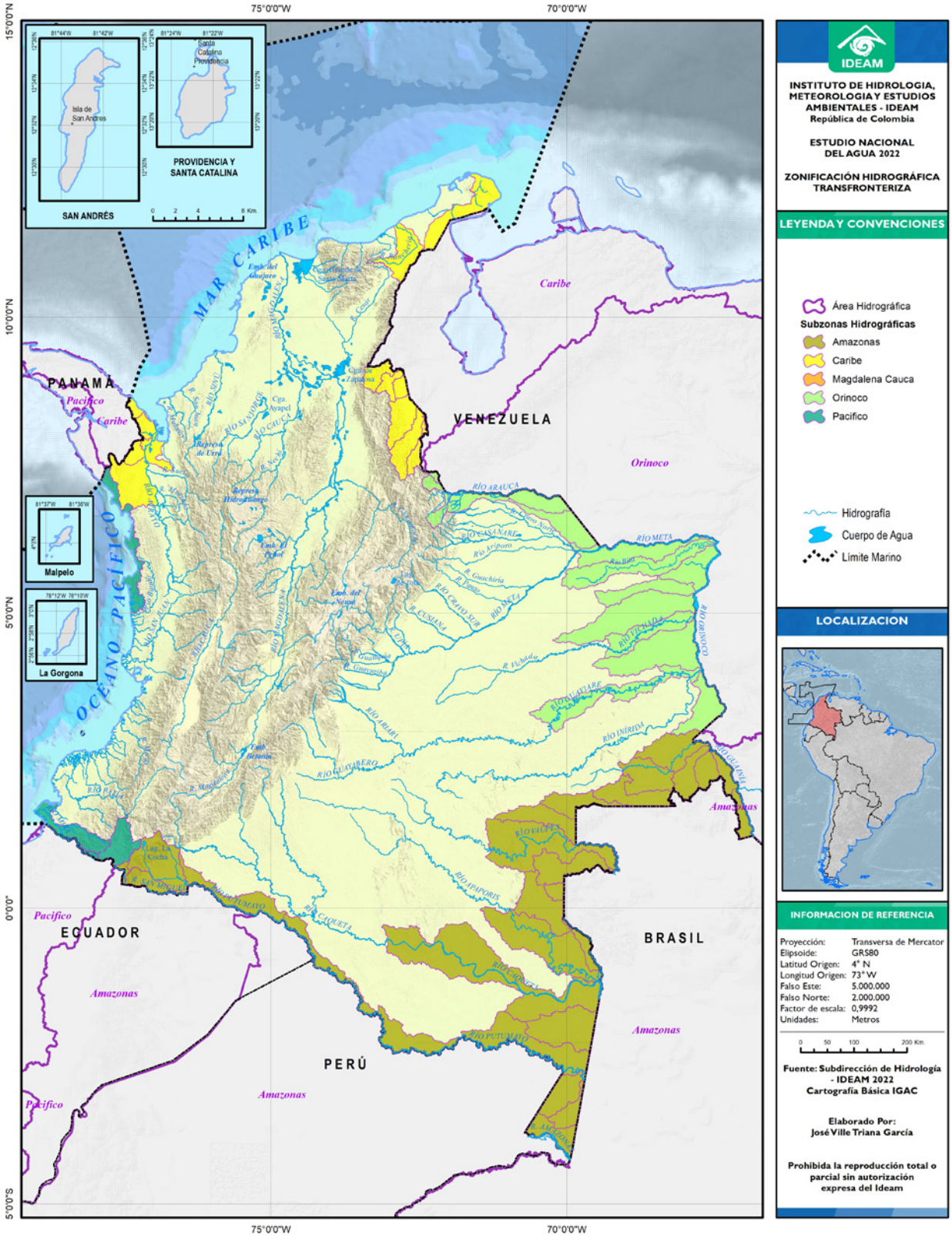



Figura 4. Subzonas hidrográficas transfronterizas.




Figura 5. Sistemas acuíferos transfronterizos de Sudamérica (Unesco, 2017).

Es importante resaltar la huella hídrica verde asociada a la apropiación humana de esta agua (almacenada en el suelo). Esta agua verde se cuantifica mediante la estimación del agua evapotranspirada por la vegetación asociada a procesos antrópicos (cultivos), que no tiene como origen el agua de riego (agricultura de secano). Permite una aproximación numérica a la competencia por el agua verde entre el sector agropecuario y los ecosistemas naturales. Por otro lado, la huella hídrica azul es la apropiación de agua azul (ríos, lagos, acuíferos) correspondiente a la extracción o retención de esta en una fuente superficial o subterránea que no retoma a la cuenca y, por lo tanto, no está disponible para ningún otro uso.

Aún quedan valores por definir para la recarga de acuíferos. Ya en el ENA 2010 se realizaron importantes aproximaciones para estimar reservas de aguas subterráneas en Colombia a partir de áreas, espesores y rendimientos específicos *(Specific Yield Sy)* de provincias hidrogeológicas. No obstante, aún es muy incipiente el conocimiento de los sistemas acuíferos para precisar con confiabilidad e incertidumbre razonable los valores de la recarga nacional. Estos valores de recarga están determinados únicamente para los sistemas acuíferos de corporaciones con avances significativos del conocimiento de los sistemas acuíferos de su jurisdicción y los que ha estimado el SGC en sus estudios hidrogeológicos de algo más del 15 % del potencial hidrogeológico nacional (Ideam, 2010).

Tampoco se tienen valores definidos para las importaciones de agua que corresponden al volumen de agua virtual asociada a la importación de bienes o servicios en el país o, dicho de otra manera, al volumen total de agua utilizada (en las áreas de exportación) para producir los productos que se importan.

Los resultados de los análisis realizados desde el ENA 2014 permiten definir el agua virtual a partir de la huella hídrica de los principales productos de exportación y también determinar si se trata de agua verde o de agua azul.

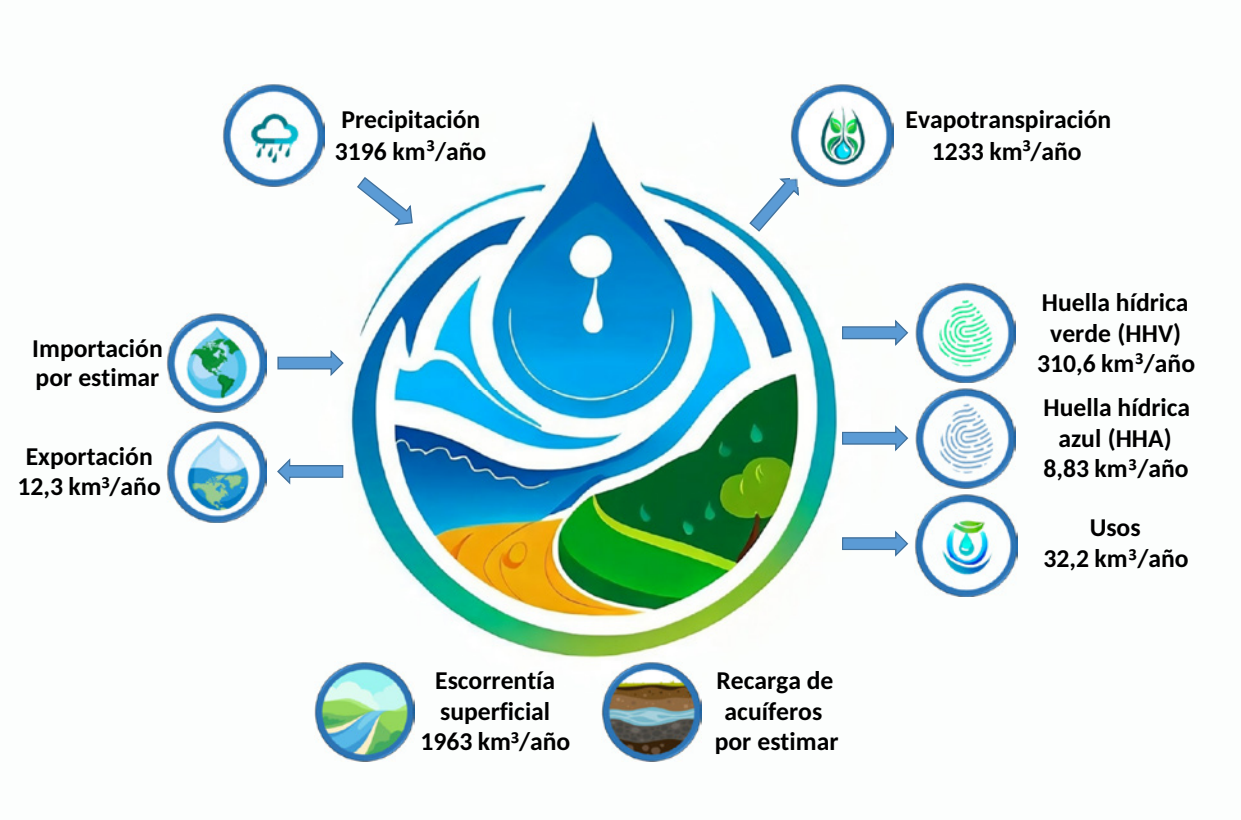



Figura 6. Balance hídrico nacional.

## 1.2 Contexto socioeconómico

> La economía colombiana se ha recuperado de forma vibrante de la crisis del COVID-19, soportada por el impulso del consumo que había sido reprimido durante la pandemia. El PIB repuntó un 10,7 % en 2021 y se prevé que crezca un 7,1 % en 2022. Esta excepcional dinámica ha llevado a la economía a operar por encima de su potencial y, se prevé que el crecimiento se reduzca gradualmente hasta 2,8 % en 2025. (Banco Mundial, 2022)

La fuerte demanda interna, la depreciación del peso colombiano, la indexación de los salarios y de los precios regulados, y las presiones de los precios internacionales empujaron la inflación hacia el 10. En consecuencia, el Banco Central aumentó la tasa de política monetaria al 10 % a finales de septiembre (Banco Mundial, 2022).

Con alrededor de 1,4 millones de personas que salieron de la pobreza en 2021, la tasa nacional de pobreza se redujo a 39,3 %, todavía por encima de los niveles previos a la pandemia. La clase media también repuntó y la desigualdad de ingresos disminuyó. No obstante, se estima que 2,1 millones de personas que habían caído en la pobreza en 2020, seguían siendo pobres en 2021. Además, el descenso de la pobreza ha estado desigual y no ha beneficiado a los afrocolombianos ni a los indígenas. Las condiciones de vida de migrantes venezolanos y las víctimas del conflicto experimentaron una mejora, pero desde una mala situación de pobreza extrema previa a la pandemia. Aunque se prevé que la pobreza disminuya en 2022, se estima que la inflación (sobre todo la de los alimentos) ralentizará la reducción de esta, afectando sobre todo a los habitantes de las zonas rurales y a los pobres extremos (Banco Mundial, 2022).

Colombia sigue enfrentándose a importantes retos estructurales. En primer lugar, la tasa de crecimiento potencial es insuficiente para garantizar la convergencia de la renta per cápita con la de los países de altos ingresos. En segundo lugar, el país sigue siendo uno de los más desiguales del mundo. Aunque el repunte económico de 2021 y la continuación de los programas de transferencias de emergencia han contribuido a reducir la pobreza, la alta inflación está minando el progreso y la recuperación no está llegando a todos los grupos. Para reducir la pobreza de forma duradera y aumentar la resiliencia entre los no pobres, es necesario ampliar la cobertura del sistema de seguridad social, reducir las rigideces en la inclusión automática a los programas sociales, hacer que los mercados laborales sean más eficientes e inclusivos, y mejorar el nivel y la calidad de la educación, la salud y la infraestructura. En tercer lugar, el déficit de cuenta corriente (aunque está disminuyendo) sigue siendo elevado, y la reducción sostenible del déficit fiscal y de la relación deuda-PIB del Gobierno requerirá un aumento duradero de los impuestos y reducción de los subsidios a los combustibles. Por último, Colombia debe empezar a prepararse para el cambio climático, introduciendo no solo medidas de adaptación y mitigación, sino también una profunda reforma estructural que facilite la adopción de la tecnología, la innovación y la diversificación de sus exportaciones (Banco Mundial, 2022).

La reforma fiscal presentada en agosto pretende aumentar el recaudo fiscal (incluso de nuevos impuestos) y la progresividad del impuesto sobre la renta de las personas. Una mayor recaudación permitiría reforzar el sistema de protección social y asegurar la reducción del déficit fiscal (Banco Mundial, 2022).

### 1.2.1 Demografía

De acuerdo con el censo 2018, la población total de Colombia fue de 48.258.494 personas. La población proyectada a 2020 es 50.372.424 de habitantes que se distribuyen: el 76 % en las áreas urbanas y el 24 % en las rurales. La densidad total de población es de 44 habitantes por $km^2$. El 52 % de la población son mujeres y el 48,8 % son hombres (DANE, 2018).

El 77,1 % de la población se encuentra en cabeceras municipales, el 7,1 % en centros poblados y el 15,8 % corresponde a población rural dispersa. Los departamentos más poblados son Antioquia, Valle del Cauca, Atlántico, Santander, Bolívar y Bogotá D. C. (Ver Figura 7 y Tabla 2).

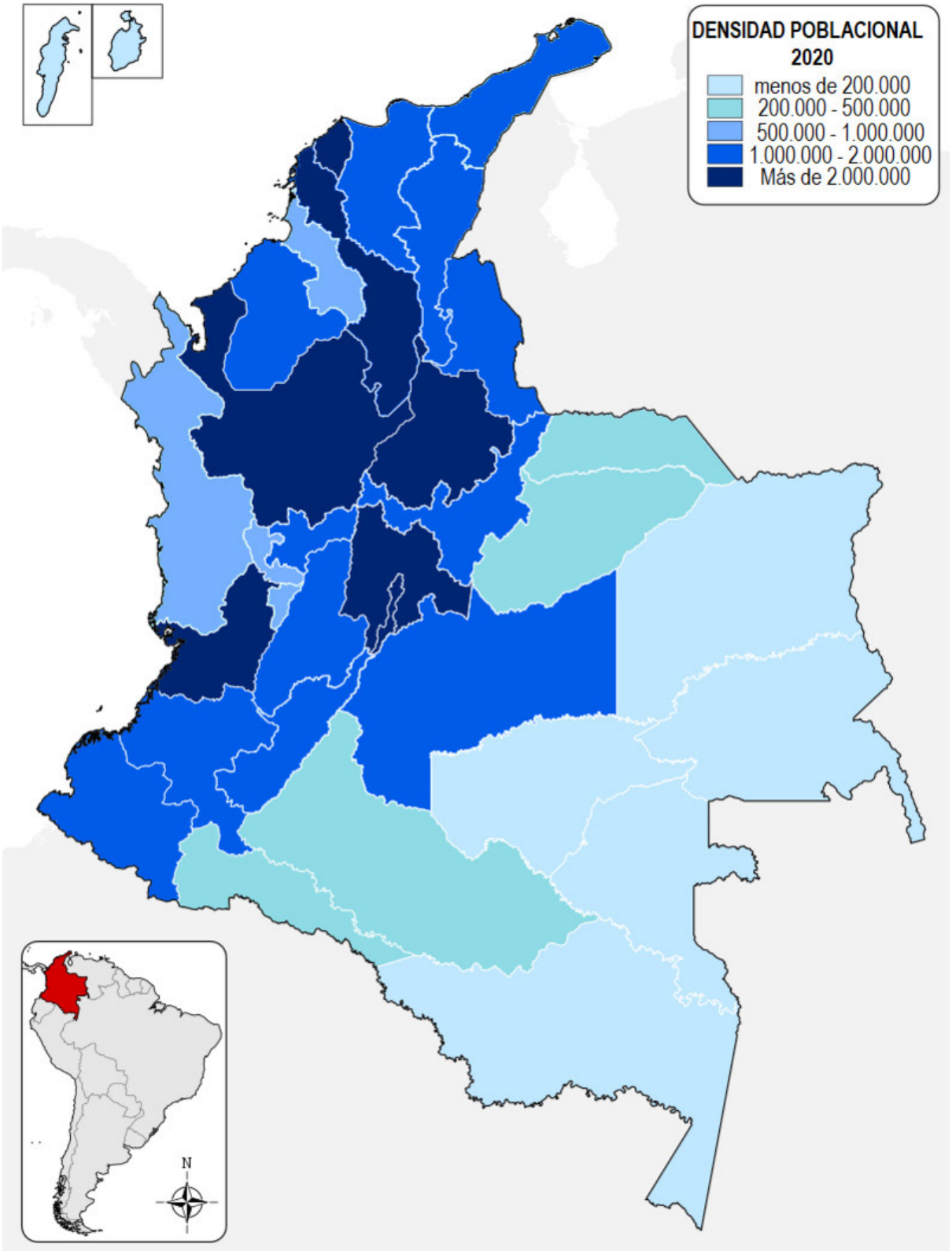



Figura 7. Departamentos por población para el 2020 según estimaciones del DANE (2018).

Tabla 2. Población de la capital como proporción de la población del departamento.

| Departamento | Ciudad capital | Población departamental en cabeceras municipales | Población departamental en centros poblados y rurales dispersos | Total | Población de la capital en la cabecera municipal | Población de la capital en centros poblados y rurales dispersos | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bogotá D.C. | Bogotá D.C. | 7.715.778 | 28.177 | 7.743.955 | 7.715.778 | 28.177 | 7.743.955 |
| Antioquia | Medellín | 5.281.409 | 1.396.521 | 6.677.930 | 2.490.164 | 43.260 | 2.533.424 |
| Valle del Cauca | Cali | 3.866.560 | 665.592 | 4.532.152 | 2.205.680 | 46.936 | 2.252.616 |
| Atlántico | Barranquilla | 2.582.828 | 139.300 | 2.722.128 | 1.273.646 | 604 | 1.274.250 |
| Bolívar | Cartagena de Indias | 1.618.648 | 562.328 | 2.180.976 | 914.552 | 114.184 | 1.028.736 |
| Norte de Santander | San José de Cúcuta | 1.282.673 | 337.645 | 1.620.318 | 748.948 | 28.158 | 777.106 |
| Santander | Bucaramanga | 1.745.543 | 535.365 | 2.280.908 | 597.316 | 10.112 | 607.428 |
| Meta | Villavicencio | 810.588 | 252.866 | 1.063.454 | 502.047 | 43.255 | 545.302 |
| Tolima | Ibagué | 919.228 | 420.770 | 1.339.998 | 501.991 | 39.110 | 541.101 |
| Magdalena | Santa Marta | 990.218 | 436.808 | 1.427.026 | 484.025 | 54.587 | 538.612 |
| Cesar | Valledupar | 973.958 | 321.429 | 1.295.387 | 468.165 | 64.791 | 532.956 |
| Córdoba | Montería | 952.215 | 876.732 | 1.828.947 | 395.184 | 110.150 | 505.334 |
| Risaralda | Pereira | 762.433 | 198.622 | 961.055 | 399.283 | 77.744 | 477.027 |
| Caldas | Manizales | 768.945 | 249.508 | 1.018.453 | 420.933 | 25.227 | 446.160 |
| Nariño | Pasto | 713.629 | 913.960 | 1.627.589 | 305.360 | 87.229 | 392.589 |
| Huila | Neiva | 679.667 | 442.955 | 1.122.622 | 340.512 | 23.896 | 364.408 |
| Cauca | Popayán | 546.627 | 945.310 | 1.491.937 | 267.389 | 58.088 | 325.477 |
| Quindío | Armenia | 488.246 | 67.155 | 555.401 | 297.052 | 7712 | 304.764 |
| Sucre | Sincelejo | 591.085 | 358.167 | 949.252 | 259.435 | 34.516 | 293.951 |
| La Guajira | Riohacha | 473.082 | 492.636 | 965.718 | 147.244 | 54.595 | 201.839 |
| Boyacá | Tunja | 736.624 | 506.107 | 1.242.731 | 171.461 | 7802 | 179.263 |
| Casanare | Yopal | 309.971 | 125.224 | 435.195 | 152.421 | 25.267 | 177.688 |
| Caquetá | Florencia | 267.010 | 143.511 | 410.521 | 152.536 | 20.475 | 173.011 |
| Chocó | Quibdó | 243.102 | 301.662 | 544.764 | 112.380 | 18.445 | 130.825 |
| Cundinamarca | Girardot | 2.401.827 | 841.172 | 3.242.999 | 105.896 | 3896 | 109.792 |
| Arauca | Arauca | 192.586 | 101.620 | 294.206 | 83.256 | 13.558 | 96.814 |
| Putumayo | Mocoa | 182.286 | 176.841 | 359.127 | 40.689 | 18.249 | 58.938 |
| Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina | San Andrés | 45.570 | 18.122 | 63.692 | 42.024 | 15.409 | 57.433 |
| Guaviare | San José del Guaviare | 48.719 | 37.938 | 86.657 | 38.684 | 17.136 | 55.820 |

| Departamento | Ciudad capital | Población departamental en cabeceras municipales | Población departamental en centros poblados y rurales dispersos | Total | Población de la capital en la cabecera municipal | Población de la capital en centros poblados y rurales dispersos | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Amazonas | Leticia | 38.977 | 40.043 | 79.020 | 35.191 | 14.546 | 49.737 |
| Guainía | Inírida | 23.251 | 27.385 | 50.636 | 22.251 | 11.432 | 33.683 |
| Vaupés | Mitú | 12.947 | 31.765 | 44.712 | 10.399 | 22.394 | 32.793 |
| Vichada | Puerto Carreño | 27.709 | 85.249 | 112.958 | 15.697 | 4597 | 20.294 |

Fuente: DANE, 2018.

Las tres ciudades principales por tamaño poblacional son Bogotá, Medellín y Cali. Es importante anotar que Bogotá es tres veces más grande que Medellín y Cali; y es cerca de 40 veces más grande que Riohacha, que ocupa el puesto 32 (DANE, 2018).

#### 1.2.1.1 Comunidades étnicas

A partir de la Encuesta de Calidad de Vida (ECV) de 2018 (que tiene cobertura departamental y cuenta con cerca de 287.000 personas encuestadas), el DANE determinó que, en 2018, la cantidad de población negra, afrocolombiana, raizal, palenquera (NARP) era de 4.671.160 personas, número que corresponde al 9,34 % de la población total nacional. Según el Censo Nacional de Población y Vivienda de 2018, la población que se autorreconoce como gitana o rom en el país suma 2649 personas. Según el Censo Nacional de Población y Vivienda (CNPV) 2018, la población que se autorreconoce como indígena en el país es de 1.905.617 personas. Alrededor del 58,3 % de esta población se localiza en 717 resguardos de propiedad colectiva, mientras que el 7,3 % de personas pertenecientes a comunidades afrodescendientes habita en 178 territorios colectivos de su propiedad, organizados en torno a consejos comunitarios (Figura 8) (DANE, 2018).

La población indígena es más joven en departamentos con alta presencia de resguardos indígenas en zonas de difícil acceso: Arauca, Chocó, Magdalena, Vaupés, Vichada, Guainía. La población indígena más envejecida se encuentra en departamentos de la región andina: Bogotá D. C., Cundinamarca, Caldas, Santander, Tolima y Nariño (DANE, 2018).

### 1.2.2 Contexto económico

La Tabla 3 consigna el valor del PIB de Colombia para los años 2008, 2012, 2016 y 2020, que corresponden a los años base de información publicada en los diferentes ENA 2010, 2014, 2018 y 2022, con sus respectivas tasas de crecimiento anual y el valor per cápita en pesos y en dólares (DANE, 2022).

Tabla 3. PIB total para 2008, 2012, 2016, 2020 y tasa de crecimiento anual PIB per cápita.

| Concepto | Producto interno bruto (miles de millones) | Tasa de crecimiento anual | PIB per cápita en pesos | PIB per cápita en dólares* |
|---|---|---|---|---|
| 2008 | 605.713 | 3,3 % | 14.042.582,68 | 6233,61 |
| 2012 | 711.415 | 3,9 % | 15.808.670,32 | 8812,26 |
| 2016 | 821.489 | 2,1 % | 17.541.895,48 | 5828,78 |
| 2020 | 821.634 | -6,8 % | 16.311.180,56 | 4702,43 |

*Tasa de cambio promedio mensual diciembre de cada año.

Fuente: DANE, 2022.

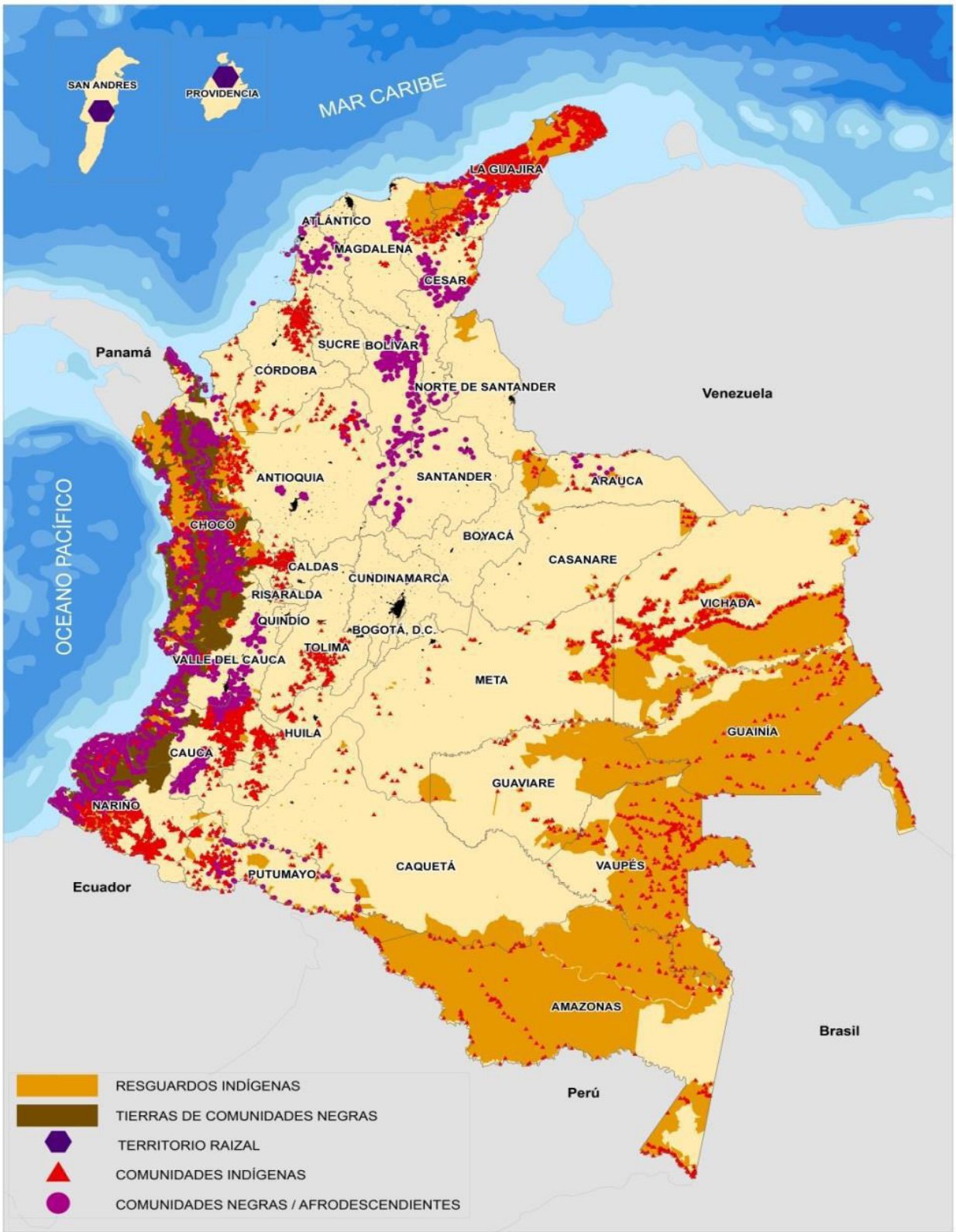



Figura 8. Áreas de reglamentación especial étnica y comunidades étnicas. Total nacional (DANE, 2014).

Para 2021, el PIB nacional fue de 1.177.225 miles de millones de pesos, a precios corrientes. Los departamentos con mayor PIB son Bogotá D.C. y Antioquia, con 298.268 y 176.451 miles de millones de pesos, respectivamente. Por su parte, los departamentos con menor PIB son Guainía y Vaupés, con 431 y 323 miles de millones de pesos, respectivamente (DANE, 2022).

La Tabla 4 presenta las tasas de crecimiento del PIB de Colombia por grandes sectores económicos desde 2008 hasta 2020. El último año reafirma el decrecimiento de los sectores. El sector secundario resultó más afectado en comparación con los demás, con una tasa negativa del 14,8 %; le sigue el sector primario con -5.4 % y el terciario con -4.8 %.

Tabla 4. PIB por grandes ramas de actividad económica (primario, secundario, terciario) para 2020 y tasa de crecimiento anual.

| Concepto | 2008 | 2012 | 2016 | 2020 |
|---|---|---|---|---|
| **Sector primario** | 3,4 % | 4,0 % | -0,1 %<br>4,8 % | -5,4 % |
| Agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca | -0,8 % | 2,5 % | 2,7 % | 2,8 % |
| Explotación de minas y canteras | 9,4 % | 5,4 % | -2,9 % | -15,7 % |
| **Sector secundario** | 3,1 % | 2,4 % | 3,4 % | -14,8 % |
| Industrias manufactureras | 0,4 % | 0,8 % | 3,2 % | -7,7 % |
| Construcción | 9,9 % | 5,9 % | 3,6 % | -27,7 % |
| **Sector terciario** | 3,1 % | 4,2 % | 2,3 % | -4,8 % |
| Suministro de electricidad, gas, vapor y aire acondicionado; distribución de agua; evacuación y tratamiento de aguas residuales, gestión de desechos y actividades de saneamiento ambiental | 0,5 % | 2,1 % | 0,0 % | -2,6 % |
| Administración pública y defensa; planes de seguridad social de afiliación obligatoria; educación; actividades de atención de la salud humana y de servicios sociales | 2,1 % | 5,6 % | 3,7 % | 1,0 % |
| Comercio y demás servicios | 3,6 % | 3,9 % | 1,9 % | -6,9 % |

Fuente: DANE, Cuentas departamentales (DANE, 2022).

En la Tabla 5 se presentan las actividades económicas en 2020 para las principales ciudades del país, en miles de millones de pesos corrientes.

El producto interno bruto creció 7,5 % en el año 2022 respecto al año 2021. Según el DANE (2022), las actividades económicas que más contribuyen a la dinámica del valor agregado son:

- Comercio al por mayor y al por menor; reparación de vehículos automotores y motocicletas; transporte y almacenamiento; alojamiento y servicios de comida (crece 10,7 %, contribuye 2,1 puntos porcentuales a la variación anual).
- Industrias manufactureras crece el 9,8 % (contribuye 1,2 puntos porcentuales a la variación anual).
- Actividades artísticas, de entretenimiento y recreación y otras actividades de servicios.

En el mes de enero de 2023, el número de personas ocupadas en el total nacional fue 21.492.000 (Tabla 6).

Las ramas que más aportaron en forma positiva a la variación de la población ocupada fueron: alojamiento y servicios de comida (1,6 puntos porcentuales); actividades profesionales, científicas, técnicas y de servicios administrativos; actividades artísticas, entretenimiento recreación y otras actividades de servicios; e industrias manufactureras, cada una con 1,0 puntos porcentuales.

Tabla 5. Actividades económicas año 2020 por municipio en miles de millones de pesos corrientes.

| Código municipio | Municipio | Actividades primarias | Actividades secundarias | Actividades terciarias | Valor agregado | Peso relativo municipal en el valor agregado departamental (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Miles de millones $ corrientes | | | | |
| 11001 | Bogotá D.C. | 303,94 | 26.987,05 | 206.510,74 | 233.801,73 | 100 |
| 5001 | Medellín | 164,35 | 11.017,02 | 45.729,96 | 56.911,34 | 41,91 |
| 76001 | Cali | 80,38 | 4997,12 | 37.343,24 | 42.420,75 | 46,96 |
| 8001 | Barranquilla | 2,83 | 5.905,53 | 20.824,42 | 26.732,79 | 66,54 |
| 13001 | Cartagena de Indias | 26,13 | 7.105,38 | 13.304,48 | 20.435,99 | 66,04 |
| 68001 | Bucaramanga | 35,78 | 2.713,69 | 11.524,31 | 14.273,78 | 27,45 |

Fuente: DANE Cuentas Departamentales (DANE, 2022).

Tabla 6. Distribución porcentual, variación absoluta y contribución a la variación de la población ocupada según rama de actividad. Total nacional (2022/2023).

| Rama de actividad | Total | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Enero de 2022 | Enero de 2023 | Distribución | Variación absoluta | Contribución en PP. |
| Población ocupada | 20,696 | 21,492 | 100 | 796 | |
| Alojamiento y servicios de comida | 1255 | 1592 | 7,4 | 336 | 1,6 |
| Actividades profesionales, científicas, técnicas y de servicios administrativos | 1706 | 1914 | 8,9 | 208 | 1 |
| Actividades artísticas, entretenimiento, recreación y otras actividades de servicios | 1644 | 1849 | 8,6 | 205 | 1 |
| Industrias manufactureras | 2069 | 2270 | 10,6 | 201 | 1 |
| Transporte y almacenamiento | 1471 | 1662 | 7,7 | 191 | 0,9 |

| Rama de actividad | Total | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Enero de 2022 | Enero de 2023 | Distribución | Variación absoluta | Contribución en PP. |
| Actividades inmobiliarias | 184 | 245 | 1,1 | 62 | 0,3 |
| Información y comunicaciones | 386 | 431 | 2 | 45 | 0,2 |
| Comercio y reparación de vehículos | 3904 | 3913 | 18,2 | 10 | 0 |
| Agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca | 2963 | 2957 | 13,8 | -6 | 0 |
| Suministro de electricidad, gas, agua y gestión de desechos | 639 | 628 | 2,9 | -11 | -0,1 |
| Actividades financieras y de seguros | 449 | 380 | 1,8 | -68 | -0,3 |
| Administración pública y defensa, educación y atención de la salud humana | 2457 | 2244 | 10,04 | -214 | -1 |

Fuente: DANE (2023). Indicadores del mercado laboral.

### 1.2.3 Cobertura de acueducto y alcantarillado

En cuanto a cobertura de acueducto y saneamiento básico, el estudio sectorial de acueducto y alcantarillado publicado por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios en diciembre de 2021 evidencia una mejora en los indicadores de gestión de las empresas; entre estos, la continuidad (a nivel nacional) en cabeceras urbanas, la cual es de 22,3 horas de suministro al día o el nivel de pérdidas de agua de 41 %, que de hecho refleja una disminución de 3 puntos porcentuales frente al 2017 (SSPD, 2021).

Para el cálculo de la cobertura a nivel municipal, urbano y rural (Tabla 7), se toma el número total de predios residenciales del país, estimados en 13.524.489 (municipal), 9.720.549 (urbano) y 3.803.940 (rural). Para la vigencia 2020, el reporte de estratificación y cobertura (REC) fue habilitado para los 1102 municipios del país; sin embargo, 50 municipios no reportaron información al SUI (SSPD, 2021).

A partir de la información reportada para el año 2020, se observa que el 20 % de municipios presentan una cobertura municipal de servicio público de acueducto superior al 90 % (221 municipios del país), mientras que el 6,8 % presentaron coberturas inferiores al 15 % (75 municipios). Por su parte, 50 municipios no reportan información al SUI o no reportan predios residenciales para el cálculo de coberturas (SSPD, 2021).

Este capítulo de contexto permite reconocer particularidades geográficas, hidrográficas, demográficas y socioeconómicas a nivel general, que serán útiles en los siguientes capítulos. No pretende abordar particularidades temáticas o singularidades que corresponden al juicioso análisis de otras especialidades.

Tabla 7. Cobertura de acueducto y alcantarillado.

| | Cobertura municipal nacional 2020 | | Cobertura urbana nacional 2020 | | Cobertura rural nacional 2020 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Predios con acceso a servicios | % de cobertura | Predios con acceso a servicios | % de cobertura | Predios con acceso a servicios | % de cobertura |
| Acueducto | 9.698.822 | 71 | 8.262.464 | 85 | 1.436.358 | 37 |
| Alcantarillado | 8.578.432 | 63 | 7.957.755 | 81 | 620.677 | 16 |
| Aseo | 8.759.791 | 64 | 7.973.852 | 81 | 785.939 | 20 |



Crédito:
Jenny Paola Marín Salazar
PNN El Cocuy - sendero Púlpito del Diablo

CAPÍTULO 2

# ENFOQUE CONCEPTUAL Y METODOLÓGICO DE LA EVALUACIÓN INTEGRAL DEL AGUA EN EL ENA 2022

**Autores:**

**IDEAM:**
Martha García Herrán
Nelson Omar Vargas Martínez
José Ville Triana García

# 2. Enfoque conceptual y metodológico de la evaluación integral del agua en el ENA 2022

El Estudio Nacional del Agua representa la síntesis de la evaluación del agua que realiza el Ideam desde su misionalidad de manera continua y que se concreta cada cuatro años en estos estudios. La versión 2022 se aborda, como en las evaluaciones anteriores (del ENA 1998 al ENA 2018), desde el concepto de integralidad y enfoque sistémico de los ciclos y procesos de la naturaleza; y reconoce el agua como elemento vital, estructurante del medio natural y decisivo en la dinámica de los procesos sociales y productivos (Ideam, 2010).

El marco de conceptos y metodologías que dan soporte a la versión 2022 tiene como referentes básicos los ENA anteriores y, en particular, el ENA 2018. Integra los avances de los últimos cuatro años, fruto de estudios e investigaciones del Ideam y de otras entidades nacionales y regionales que aportan para mejorar, profundizar y complementar los conceptos, las metodologías de aproximación y la resolución espaciotemporal de la información. En el análisis se incluyen temas nuevos que complementan y amplían el espectro de la evaluación, tales como: la hidrología isotópica; los índices multivariados de sequías; la susceptibilidad al desabastecimiento hídrico en época de lluvia; y aportes del Ideam y del ENA a las metas e indicadores de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), con énfasis en el ODS 6, sobre agua limpia y saneamiento.

En este capítulo se presenta una síntesis de la actualización del marco de conceptos, del sistema de indicadores, del análisis integrado del agua, del alcance general y de la metodología que soporta la versión ENA 2022.

## 2.1 Síntesis del enfoque conceptual

La evaluación nacional del agua en Colombia tiene como modelo básico los componentes del ciclo del agua, y sus procesos e interacciones con el medio natural, con la sociedad y con la economía. Esta evaluación considera, de manera particular, la interacción del ciclo del agua con las dinámicas de producción y transporte de sedimentos en el marco del ciclo de sedimentos.

El modelo básico de evaluación integrada del agua parte de las características de los procesos que se dan en el ciclo del agua y en el de sedimentos, en la identificación y cuantificación de las presiones por procesos de transformación e intervención sobre el medio natural y en el estudio e interpretación de las afectaciones e impactos en unidades de análisis espaciales y temporales determinadas. Con base en lo anterior, se evalúan los cambios de condiciones y tendencias teniendo en cuenta los resultados de los ENA anteriores. Se espera que, a medida que se fortalezcan la información y el conocimiento, se puedan evaluar los cambios de condiciones asociados también con las políticas de gestión ambiental e integrada del agua.

La evaluación se centra en el análisis de los procesos naturales, y en la manera en que inciden las actividades humanas en la variabilidad, estado y cuantificación del agua tanto superficial como subterránea en las diferentes regiones del país. Estos procesos e interacciones que ocurren de manera continua se evalúan para diferentes niveles de resolución espacial y temporal en el territorio nacional (Ideam, 2019).

### 2.1.1 Ciclo del agua y ciclo de sedimentos

El ciclo del agua está representado en una sucesión de fases por las que pasa el agua en su movimiento de la atmósfera a la Tierra y en su retorno a la primera: evaporación del agua del suelo, del mar y de las aguas continentales; condensación en forma de nubes; precipitación, interceptación, infiltración, percolación, escorrentía, acumulación en el suelo o en cuerpos de agua y reevaporación (OMM-Unesco, 2012).

Como se expresa en el documento síntesis del enfoque conceptual del capítulo sobre «agua superficial» del Glosario Hidrológico Internacional, el agua precipitada y la proveniente del deshielo cae a la superficie terrestre en forma de escorrentía superficial, lo que provoca que el agua líquida forme

cuerpos de agua (como ríos y lagos) que dirigen el agua hacia el mar para completar así el ciclo. Parte del agua superficial se filtra hacia el suelo, saturando parte de este y creando depósitos subterráneos o acuíferos. El agua subterránea se mueve, alimentando los cuerpos de agua superficiales o drenando directamente al mar, para cerrar de nuevo el ciclo. La comprensión y cuantificación de los volúmenes de agua, entradas, salidas y las variaciones en el almacenamiento en este ciclo se realiza aplicando el principio de conservación de masa a través del denominado *balance hídrico* (Figura 9).

El balance hídrico define los cambios en el almacenamiento de agua dentro del sistema en el tiempo, en función de las entradas y salidas de agua. Estas variaciones en el almacenamiento de distintos volúmenes de agua son estimadas por una serie de conceptualizaciones de la física de los procesos, representando la entrada y la salida del agua en cada una de las fases del ciclo hidrológico. Estas estimaciones se realizan a través de modelos hidrológicos que pueden ser clasificados bajo distintos criterios, como la conceptualización, la escala temporal, la agregación y la

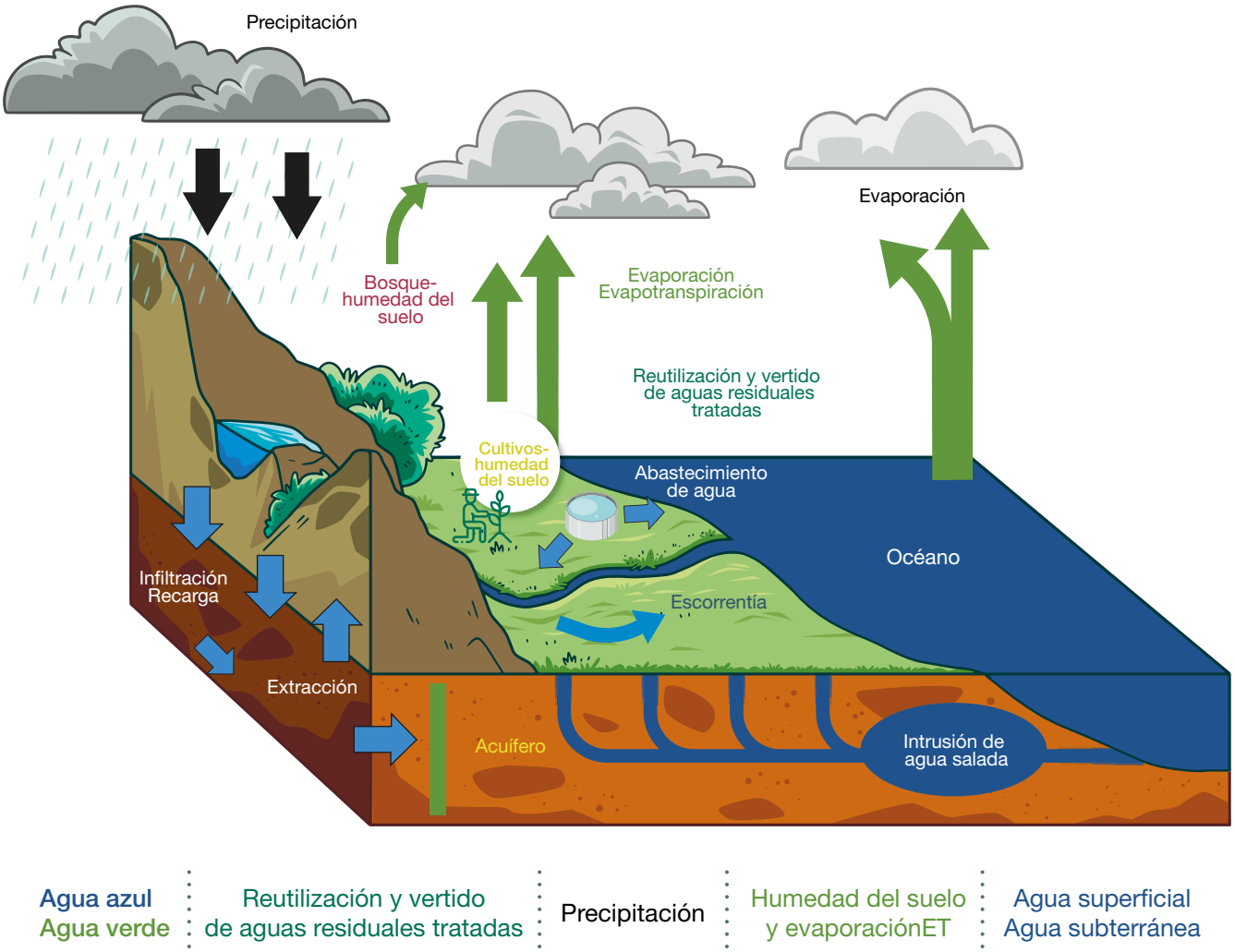



Figura 9. Ciclo del agua.
Fuente: (Ideam, 2015).

complejidad, entre otros, como se describe en el Protocolo de Modelación Hidrológica e Hidráulica (Ideam, 2018).

El *agua verde* se considera como el flujo vertical de agua, o agua almacenada en el suelo que soporta la vegetación en secano, que se mantiene en el suelo y recarga las fuentes de agua superficial o subterránea. Este concepto permite, de forma implícita, considerar ecosistemas naturales como usuarios visibles del agua (Ideam, 2015). De acuerdo con la agencia de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el *agua azul* se corresponde con el flujo horizontal de agua; es decir, con el agua de escorrentía, de las fuentes de agua superficial, ríos y lagos; de las fuentes de agua subterránea, de acuíferos.

El ciclo de sedimentos en cuencas hidrográficas comprende los procesos de producción, transporte y depósito de sedimentos. El análisis de los sedimentos en el ENA se realiza a partir de los componentes del ciclo de sedimentos en función de los procesos que se dan en ladera y en cauce, en diferentes escalas espaciales y temporales. El esquema que ilustra estos procesos en cuencas hidrográfica se muestra más adelante, en el capítulo del ENA 2022 que trata sobre la «Dinámica de los sedimentos».

En este estudio también se actualizan los análisis cuantitativos y cualitativos de los principales componentes del ciclo del agua, sus procesos, balances e interacciones, teniendo en cuenta las variaciones y la cuantificación de las variables que los representan para las unidades espaciales y temporales representativas a escala nacional.

En los puntos 2.1.2 y 2.1.3, se sintetizan el sistema de indicadores y el modelo base para el análisis integrado que soportan la actualización de la evaluación integrada del agua. En aras de tener coherencia y comparabilidad, el referente base para el ENA 2022 es el ENA 2018, tanto para indicadores como para el modelo de análisis. Sin embargo, se realizaron ajustes y complementos basados en avances en los desarrollos temáticos que cuentan con los sustentos correspondientes presentados en los capítulos respectivos.

### 2.1.2 Sistema de indicadores hídricos

Para este ENA se conserva el esquema de indicadores definido para hacer seguimiento a las condiciones hídricas. Se compone de dos grandes grupos: los indicadores que dan cuenta del régimen del sistema hídrico natural y los indicadores asociados con la intervención antrópica. En su conjunto, permiten evaluar los cambios del estado y comportamiento de los sistemas hídricos teniendo en cuenta las presiones por uso y contaminación, el riesgo asociado con la vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico para usuarios del recurso y las tendencias.

El esquema de la Figura 10 sintetiza el sistema de indicadores hídricos actualizado con respecto al ENA 2018.

El sistema de indicadores integra la oferta con los usos y aprovechamientos, las presiones por contaminación que tienen lugar en las unidades hidrográficas que definen los sistemas hídricos a diferentes escalas en el ámbito nacional: áreas, zonas y subzonas hidrográficas; y en algunos temas específicos, con el análisis de variables en sitios de monitoreo. Los indicadores que conforman el sistema mencionado alimentan el modelo de análisis integrado que se sintetiza en el punto 2.1.3 y la evaluación nacional del agua que se presenta en el capítulo sobre «Análisis integrado del agua en Colombia» en este documento.

En el ENA 2022, además de avanzar en la resolución espacial y temporal de la información, se incluye el índice estandarizado multivariado de sequías (IEMS) que complementa el indicador SPI (índice de precipitación estandarizado) con una aproximación que tiene en cuenta no solo la precipitación, sino la humedad del suelo y la escorrentía.

Dentro de los indicadores de intervención antrópica como parte de los indicadores de riesgo, se incluye el índice de afectación por desabastecimiento hídrico (IADH) que da cuenta del grado de afectación de los sistemas en función de la recurrencia y área afectada (rural, urbana o mixta) tanto en temporada seca como en temporada de lluvia.

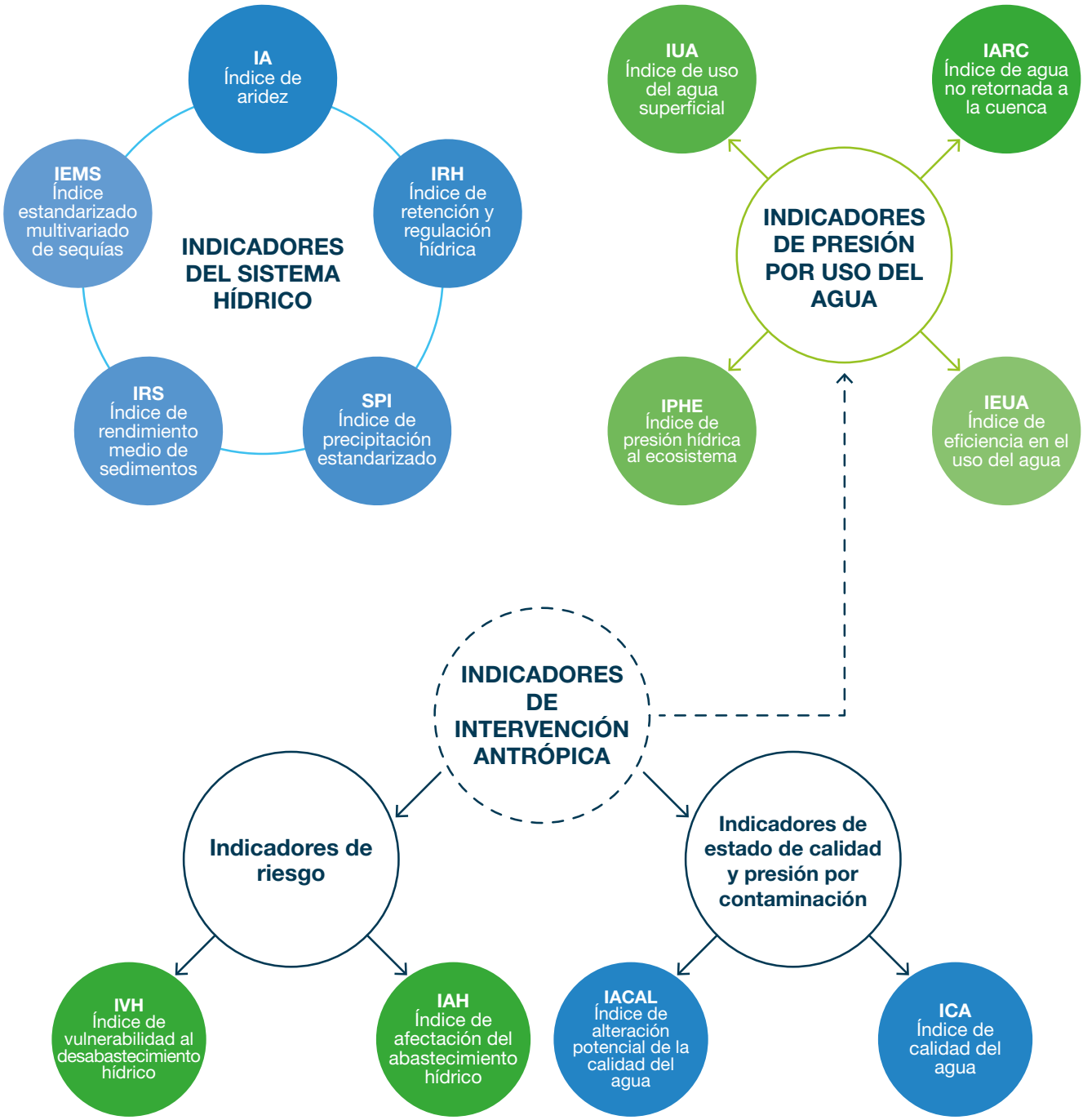



Figura 10. Sistema de indicadores hídricos para la evaluación del agua ENA 2022.
Fuente: modificado del Estudio Nacional del Agua 2018.

### 2.1.3 Enfoque del análisis integrado

El análisis conjunto de los indicadores, de los componentes del ciclo del agua y de los sedimentos (elementos de referencia mencionados en el punto 2.1) constituye la esencia del análisis integrado del agua a nivel nacional. El modelo básico para el análisis corresponde con el aplicado en los ENA 2014 y 2018, con ajustes en función de los avances en conocimiento y mejoras en aproximaciones metodológicas por fuentes y resolución de la información.

Acorde con el esquema básico aplicado para el análisis y evaluación integrada del agua presentado en el capítulo «Consideraciones finales y recomendaciones», se tiene como resultado la identificación de zonas del país con niveles diferentes de conservación, alteración o cambios que afectan la disponibilidad, variabilidad, regulación y calidad de agua superficial y subterránea. Este análisis permite, además, reconocer las zonas donde diferentes aspectos temáticos requieren especial atención y focalización de acciones específicas; o donde se presentan niveles de criticidad asociados con uno o varios aspectos analizados. Estos niveles de criticidad están asociados principalmente con altas presiones por uso con respecto a la oferta disponible y su variabilidad por cargas contaminantes a las fuentes y la erosión hídrica potencial efectiva. Como puntos importantes en la evaluación se incluyen: los factores asociados con los eventos de sequía a tres meses a partir de los índices multivariados y la susceptibilidad al desabastecimiento hídrico en temporada seca y húmeda.

El análisis integrado se soporta en matrices, con categorías desde muy baja hasta muy alta o crítica, para cada uno de los elementos temáticos mencionados para la evaluación. Con base en los resultados del análisis temático y el conocimiento experto se establecen factores de ponderación y categorías para este modelo que integra estos factores.

El análisis de los resultados permite determinar a escala nacional el estado, la dinámica y las afectaciones al agua, e identificar a nivel de subzona hidrográfica condiciones críticas de disponibilidad y de calidad del agua para diferentes condiciones hidrológicas.

## 2.2 Alcance y procedimiento metodológico general

El alcance temático y el procedimiento metodológico para la actualización del Estudio Nacional del Agua en su versión 2022 están concentrados en el desarrollo articulado de los componentes del ciclo del agua y del ciclo de sedimentos, las presiones que se ejercen sobre la disponibilidad hídrica, y sobre la calidad por uso y contaminación, respectivamente.

### 2.2.1 Alcance

Con respecto al ENA anterior (2018), muchos de los componentes tienen una mayor resolución espacial y temporal, y mayor cobertura temática. Se cuenta con avances importantes hacia la automatización; se incluyen temas nuevos y se realizan análisis de tendencias comparando los resultados con los de ENA 2010, 2014, 2018 y 2022 cuando las metodologías, estadísticas e información lo permiten.

Las temáticas nuevas están relacionadas con: hidrológica isotópica, índices multivariado de sequías, susceptibilidad al desabastecimiento hídrico municipal en temporada de lluvia, delimitación y características de cuencas y acuíferos como fuentes hídricas de abastecimiento para 72 municipios y aportes del Ideam y ENA para los reportes de indicadores de Objetivos de Desarrollo Sostenible, en especial para el ODS 6 sobre agua limpia y saneamiento, en el marco de los compromisos que tiene el país.

Este Estudio incorpora ventanas regionales en temáticas de inundaciones, isotopía y calidad de agua. Se presentan resultados de evaluación del agua en regiones específicas de especial relevancia, como la desarrollada para el Magdalena Medio, el río Bogotá y para cuerpos de agua lénticos como las ciénagas de Santa Marta, Zapatosa y Ayapel.

Adicionalmente, dados los avances en resolución espacial y temporal, se publican anexos digitales con información detallada de diferentes componentes que sirven como referente base para las evaluaciones regionales del agua, las evaluaciones sectoriales y para el uso de esta información por parte de la comunidad en general.

Se analiza la situación actual por temática: agua superficial, agua subterránea, uso de agua sectorial y multisectorial (demanda y huellas hídrica verde y azul); aguas subterráneas, estado y presiones sobre la calidad de agua superficial; erosión hídrica potencial y características de la variabilidad hidroclimática a partir del análisis de sequías e inundaciones. El alcance de cada uno de esos componentes se sintetiza en el punto 2.2.6 de este capítulo y se amplía en los capítulos correspondientes.

En el ENA se presentan las estadísticas generales sobre cantidad, calidad y usos del agua como un esfuerzo para entregar al país un panorama integral de la dinámica del agua en Colombia, tanto en su régimen natural como en el resultante de la intervención antrópica. En este contexto, se realiza el seguimiento a las condiciones actuales, y se provee información para la toma de decisiones y la focalización de acciones.

### 2.2.2 Procedimiento metodológico

El proceso metodológico sigue el mismo esquema de los ENA 2014 y 2018, y se agrupa en tres grandes áreas:

- El enfoque conceptual y metodológico general.
- La caracterización y análisis de cada componente, con base en conceptos y métodos propios de la temática específica para las unidades espaciales y temporales representativas para la evaluación nacional.
- Situación actual y tendencias del estado y dinámica del agua en Colombia y sus regiones a partir de los indicadores y del modelo de análisis integrando las temáticas.

Se documentan los cambios y ajustes pertinentes teniendo en cuenta la actualización y la profundización en algunas metodologías.

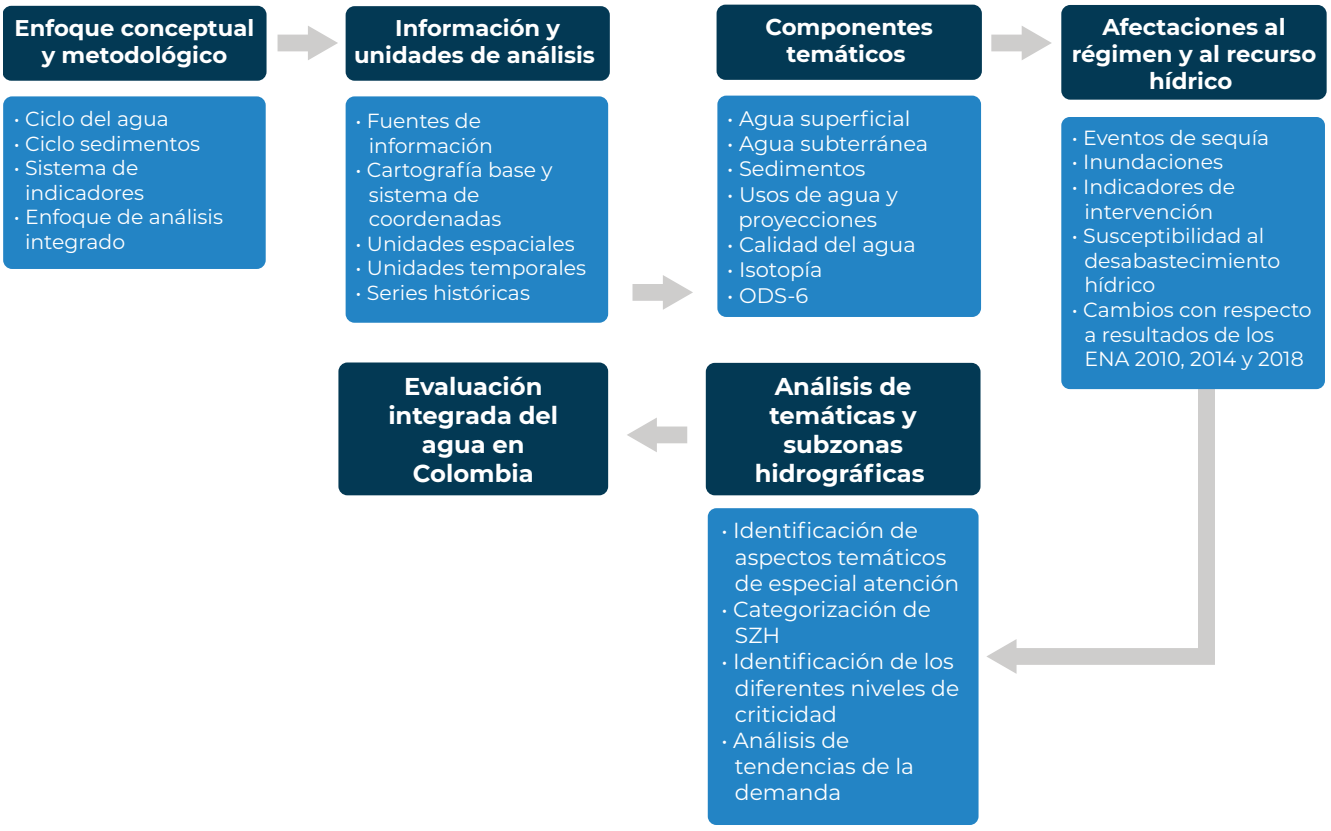



Figura 11. Esquema metodológico para el Estudio Nacional del Agua 2022.
Fuente: modificado del Estudio Nacional del Agua 2018.

En el esquema de la Figura 11, se muestra el procedimiento metodológico general para obtener la evaluación integral del agua.

En el marco de un enfoque conceptual y metodológico, las unidades espaciales y temporales de análisis se definen, las fuentes y la información pertinentes para la versión 2022 se actualizan, incluyendo el año base límite y el periodo de las series históricas por considerar en las variables, según la temática.

A partir de los análisis de los componentes y del análisis integrado del conjunto de indicadores, se identifican vulnerabilidades relacionadas con las diferentes temáticas y se desarrolla un modelo para estimar tendencias de la demanda y proyecciones de uso de agua para los sectores socioeconómicos.

### 2.2.3 Fuentes de información y cartografía de referencia

En la versión 2022, la información para actualizar el ENA es la oficial, proveniente de las entidades y de los sectores que tienen como misión producirla. En cada uno de los componentes temáticos se presentan en forma explícita las fuentes, la información y el nivel de resolución con los que se hace la actualización de los temas, los cálculos y los estimativos correspondientes.

Entre las fuentes primarias de información están las series de variables hidrológicas, meteorológicas y sedimentos de diferentes periodos, acorde con la especificidad de la temática evaluada, complementada con información satelital de variables meteorológicas. Con base en los periodos definidos, se amplía el número de estaciones con respecto al 2018 para las variables: caudales, concentración y transporte de sedimentos, y calidad del agua; este último tema incluye también los monitoreos de los convenios con la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM) y Ecopetrol. Dado que en algunos temas de agua superficial y de sedimentos se tienen aproximaciones diarias; para estaciones seleccionadas se complementan las series de algunas variables.

Las series históricas de variables hidrometeorológicas y sedimentos comprenden el periodo 1981- 2021. Los promedios multianuales corresponden al periodo 1991-2020 (30 años), acorde con la normal meteorológica y normal hidrológica (OMM); y para los extremos se utiliza todo el periodo desde 1981.

Para la evaluación del uso del agua y las cargas contaminantes se emplea información del Sistema de Información Ambiental (SIA), en particular del Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH) del Registro Único de Usuarios del Agua (RUA). Además, se hace uso de la información de encuestas, censos, estadísticas oficiales del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), Sistema Único de Información (SUI) de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios e información generada por los diferentes sectores usuarios del recurso y por las entidades del Sistema Nacional Ambiental (SINA).

El año base para los cálculos de uso del agua (demanda y huella hídrica) y de calidad es el 2020; por tanto, los datos obtenidos de la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA), la Encuesta Anual Manufacturera (EAM), la Encuesta Anual de Servicios (EAS) y la Encuesta Ambiental Industrial (EAI), entre otras fuentes, corresponden al año base. Sin embargo, dada la posibilidad de que el 2020 fuera un año muy atípico por efectos de la pandemia, se analizan estimaciones también para el 2019. Las proyecciones de uso de agua (demanda y huella hídrica) se hacen hasta el año 2040.

La cartografía básica para la actualización del Estudio Nacional del Agua (ENA 2022) es la dispuesta por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) como entidad oficial en dos escalas: 1:100.000 para los análisis espaciales y 1:500.000 del 2016 para las salidas gráficas. A nivel temático, se utiliza la división político-administrativa (departamentos, municipios, centros poblados) de la cartografía básica y la zonificación hidrográfica actualizada por el Ideam, Subdirección de Hidrología, en 2022. También se emplea la cartografía dispuesta oficialmente por diferentes instituciones del orden nacional: del Ideam, de entidades del SINA, de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD), etc., a escala 1:100.000. De manera particular, el estudio se soporta en la cartografía básica del IGAC 2016, en la de Coberturas de la Tierra 2018 (Ideam, 2021) y en la zonificación hidrográfica actualizada con base en la cartografía 1:100.000 del IGAC.

### 2.2.4 Sistema de coordenadas

Como en el ENA 2018, teniendo en cuenta la Resolución 068 del 28 de enero de 2005, se adopta el sistema de referencia Magna-Sirgas (Marco Geocéntrico de Referencia Nacional, referido al sistema Sirgas) para la consolidación y oficialización de los productos cartográficos, y la información se maneja en coordenadas geográficas. Para el cálculo de áreas y longitudes, se tienen en cuenta las resoluciones 471 del 14 de mayo de 2020 y 529 del 5 de junio de 2020, en las cuales el IGAC define que el sistema de referencia horizontal es Magna-Sirgas y la proyección cartográfica definida en un «nuevo origen único nacional» de coordenadas CTM-12.

**Nuevo origen único nacional.** La proyección cartográfica con origen nacional evita la discontinuidad de la cartografía de nuestro país; el que hubiera más de mil orígenes de coordenadas planas para los aspectos urbanos y seis en zonas rurales era insostenible. Colombia ahora tiene un sistema unificado de coordenadas para minimizar ambigüedades al realizar proyecciones cartográficas con múltiples orígenes. La proyección cartográfica definida en el Nuevo origen único nacional tiene los parámetros que se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Parámetros del Nuevo origen único nacional.

| Parámetro | Valor |
|---|---|
| Proyección | Transversa de Mercator |
| Elipsoide | GRS80 |
| Latitud origen | 4° N |
| Longitud origen | 73° W |
| Falso este | 5.000.000 |
| Falso norte | 2.000.000 |
| Factor de escala | 0,9992 |
| Unidades | Metros |

Fuente: IGAC (2020).

Las coordenadas Magna-Sirgas (Marco Geocéntrico de Referencia Nacional, referido al sistema Sirgas) son las adoptadas por el país como sistema de referencia para la cartografía oficial. En concordancia con esta norma, el sistema de referencia que se usa para la generación de todos los productos cartográficos de este estudio será el Sistema Magna-Sirgas.

La información oficial del Ideam se publica en coordenadas geográficas (GCS-MAGNA). Para realizar análisis espaciales, la información se procesa en coordenadas planas (MAGNA, Colombia, Bogotá).

Para la versión ENA 2022, se utiliza este nuevo sistema de referencia. En los análisis comparativos se tendrá presente el sistema de único origen, por si se encuentran diferencias con respecto a áreas o a otros parámetros de lo publicado en 2018 con la cartografía anterior.

### 2.2.5 Unidades espaciales y temporales de análisis

Las unidades de análisis espacial consideran todo el territorio colombiano (parte continental e insular) expresado en los niveles de zonificación hidrográfica e hidrogeológica del país: 5 áreas, 40 zonas y 316 subzonas hidrográficas; y 16 provincias hidrogeológicas y 66 sistemas acuíferos. En función de los temas y de la disponibilidad de información, se tienen otras unidades espaciales como unidades hídricas de fuentes abastecedoras de acueductos municipales y departamentales; y otras unidades específicas propias de las características temáticas.

Los análisis temporales son anuales y mensuales. El mensual se realiza en función de la pertinencia con el tema, la disponibilidad y la representatividad de la información. En algunos casos se hacen análisis a partir de información de resolución diaria, que luego se agrega para periodos mensuales o cada tres, seis o dieciocho meses, como las evaluaciones de eventos de sequías.

La información espacial se realiza teniendo en cuenta los ENA anteriores (2010, 2014 y 2018) y los estándares establecidos por el Ideam para la oficialización y disposición final. La zonificación hidrográfica de referencia es la ajustada por el Ideam,

Subdirección de Hidrología, con base en la cartografía de IGAC, escala 1:100.000.

### Zonificación hidrográfica

En el ENA 2018, se utilizó la zonificación hidrográfica de Colombia a escala 1:500.000 actualizada al 2013 que comprende: 5 áreas hidrográficas, 39 zonas hidrográficas y 316 subzonas hidrográficas.

Para el ENA 2022, la Subdirección de Hidrología actualizó esta zonificación a escala 1:100.000, con base en la información sobre cuencas hidrográficas a diferentes niveles de capas y bases de datos digitales globales disponibles para uso libre en formatos estándar. Mediante un software del Sistema de Información Geográfica (SIG) se realiza la verificación y el ajuste topológico de la información; se identifican y se codifican las cuencas según la estructura establecida por el Ideam y se editan los cierres de las cuencas en la desembocadura del río y los cruces de las divisorias de aguas.

En la nueva zonificación se mantiene la misma cantidad de áreas, zonas y subzonas hidrográficas. Los códigos de las subzonas no cambiaron, pero en algunos casos cambió el nombre con base en la cartografía básica 1:100.000.

Como resultado de la actualización, los ajustes relevantes en las subzonas se relacionan a continuación:

- La subzona Río Guarrojo (3302) disminuyó el área en 34 % y aumentó el área en 19 % en la subzona Directos Vichada Medio (3305).
- La subzona Bajo río Guainía (4105) se llevó a la desembocadura en el río Negro; con esto disminuye el área en 9 %.
- Con el cambio anterior, disminuye la subzona Directos río Negro (md) (4107) un 50 % y aumenta el área en la subzona del Medio río Guainía (4102) en 44 %.

Como insumos cartográficos de base para los diferentes análisis espaciales se utiliza la cartográfica básica 1:100.000 del 2016 (IGAC); y para las salidas gráficas, la escala 1:500.000 del 2016.

## 2.2.6 Componentes temáticos y afectaciones

En este contexto, los componentes temáticos de referencia para la actualización de la evaluación nacional del agua en el ENA 2022 se concentran en los siguientes elementos:

### Agua superficial

Este capítulo cubre la oferta y disponibilidad hídrica; el análisis de los eventos de sequía y su impacto en la oferta hídrica, se actualiza la identificación de zonas potencialmente inundables y la transformación de estas; la identificación de los cuerpos de agua lénticos y el estado actual y tendencias de los glaciares en Colombia.

### Oferta y disponibilidad hídrica

Se evalúan las características medias de la oferta hídrica superficial total, las condiciones extremas de año seco y húmedo, y el agua disponible que podría ser usada sin afectar los ecosistemas y usuarios del recurso. Se analizan las condiciones de aridez y de regulación hídrica a través de indicadores del sistema hídrico natural, la variación de la disponibilidad de agua en el tiempo y los efectos hidrológicos de esta en las áreas, zonas y subzonas hidrográficas del país. Se evalúan las diferentes variables del ciclo hidrológico a resolución diaria.

### Eventos de sequía en Colombia

Se analizan los eventos de sequía en Colombia, sus impactos en el ciclo hidrológico y la afectación sobre las variables que hacen parte del flujo del agua en el subsuelo y en las corrientes hídricas que pueden ser de mayor o menor magnitud y extensión, dependiendo de la duración y de la intensidad del evento. Este análisis se realiza a partir del uso de índices compuestos o multivariados que incorporan las variables de precipitación, humedad del suelo y escorrentía. Se hace el análisis histórico de los eventos de sequía ocurridos para diferentes agregaciones temporales (1, 3, 6, 9, 12, 18 y 24 meses). Los resultados se presentan a nivel de zona hidrográfica, subzonas y departamentos.

### Zonas potencialmente inundables y cuerpos de agua lénticos

Se identifican las zonas potencialmente inundables (ZPI) y la transformación de estas; se identifican los cuerpos de agua lénticos con base en los insumos cartográficos y estudios disponibles a escala nacional. A nivel regional, se relacionan los mapas de inundación a escala 1:2000 elaborados por el Ideam generados entre 2018 y 2021. Igualmente, se presenta el consolidado de eventos de inundación, avenidas torrenciales y crecientes súbitas con base en lo realizado por la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD, 2021) para el periodo comprendido entre el año 2000 y el 2021.

Para el nivel regional, se presentan los resultados de la caracterización hidrológica, hidráulica, hidrobiológica, fisicoquímica y sedimentológica de cuerpos de agua en el lago de Tota, las ciénagas de Zapatosa y Ayapel, y el río La Vieja.

### Glaciares y su relación con la alta montaña

Como parte del agua superficial, en el tema de glaciares y su relación con la alta montaña se presenta el estado actual y la tendencia de los glaciares nacionales mediante dos indicadores ambientales usados globalmente: balances de masa y área de glaciares. Se complementa la información con las relaciones hídricas del sistema glaciar con los demás ecosistemas de la alta montaña colombiana: el páramo y el bosque altoandino.

## Agua subterránea

En este componente se realiza una síntesis del estado actual del monitoreo a nivel nacional y a nivel regional, y los avances de redes de monitoreo implementadas por algunas autoridades ambientales regionales (corporaciones y autoridades ambientales urbanas). Adicionalmente, se actualiza el inventario de puntos de aguas subterráneas y los usos y volúmenes del agua concesionada y captada a nivel nacional durante los años 2016 a 2021 a partir de los registros de la tasa por utilización de agua (TUA).

## Sedimentos

En el capítulo de dinámica de sedimentos se tiene en cuenta un horizonte de análisis de uno a cincuenta años. Se analizan los procesos del ciclo de sedimentos dentro de una cuenca: producción, transporte y depósito a escala nacional. En este análisis, la principal fuente de producción de sedimentos es la erosión hídrica potencial; en ladera se considera la producción y en cauce el transporte y depósito de sedimentos teniendo en cuenta la conectividad de cada elemento de ladera con el cauce. Se calcula el rendimiento de sedimentos a partir de los datos observados y el balance de sedimentos.

## Isotopía

Por primera vez, el Estudio Nacional del Agua 2022 incorpora un capítulo dedicado a la hidrología isotópica con el propósito de dar a conocer los primeros resultados de la Red Nacional de Isotopía, a través de la cual se construye una base de datos isotópicos de la precipitación en Colombia. Se ilustran algunas de las aplicaciones de las técnicas isotópicas para la solución de problemas hidrológicos con base en estudios de caso ejecutados por entidades y científicos colombianos. Las temáticas de estos estudios y los sitios que revisaron son: (1) «Nitrato en el agua subterránea», a partir del estudio de ocurrencia de nitrato en el acuífero somero del Abanico del Quindío. (2) «La edad del agua subterránea», con el estudio del Eje bananero de Urabá. (3) «Identificación de zonas de recarga de acuíferos», en el Bajo Cauca antioqueño; y (4) «Conexiones entre agua superficial y agua subterránea», con el estudio sobre el aporte del agua subterránea a quebradas en Mutiscua, Norte de Santander.

## Usos sectoriales y multisectoriales de agua

Este tema aborda los usos de agua asociados con la demanda hídrica sectorial a nivel nacional, y la huella hídrica azul y verde. Se realiza el análisis de los usos de agua para Colombia, por sectores, su distribución por subzonas hidrográficas y por departamentos, a escala tanto anual como

mensual. Se hace una reseña de la evolución de los conceptos asociados con los usos del agua y sus implicaciones y se analiza la evolución de los usos del agua en Colombia desde 2008 hasta 2020 (correspondiendo con resultados de los ENA 2010, 2014, 2018 y 2022).

A partir de los resultados sectoriales y multisectoriales de usos, se determinan los indicadores de relación de la demanda sobre la oferta disponible (IUA); de agua no retornada a la cuenca (IARC); de sostenibilidad de la huella hídrica verde (IPHE), y de eficiencia en el uso del agua a partir de la relación de demanda sobre huella hídrica azul (IEUA). Como complemento del análisis, se evalúan los flujos de retorno, transvases y reúso, y los flujos de agua virtual. Se desarrollan las proyecciones de demanda de agua agrícola y los sectores no agrícolas de 2022 a 2040, incluyendo las bases conceptuales y metodológicas y el análisis multisectorial de la tendencia de la demanda total de agua.

## Calidad de agua

Este componente se actualiza con la evaluación del estado de la calidad del agua y la presión por vertimientos a las fuentes hídricas superficiales en Colombia, principalmente en función de dos indicadores: el índice de calidad del agua (ICA) y el índice de alteración potencial de la calidad del agua (IACAL). Para las condiciones de calidad se analizan variables fisicoquímicas, metales pesados en sedimentos y el ICA a partir de información de la red de referencia nacional del Ideam, de convenios y de redes de monitoreo de autoridades ambientales regionales, como las corporaciones autónomas regionales del Valle del Cauca (CVC) y de Cundinamarca (CAR). Se analizan las presiones por contaminación asociadas con los vertimientos de aguas residuales por los sectores usuarios del recurso con base en los resultados del IACAL estimado para los años 2019 y 2020 en todas las subzonas hidrográficas. Además, se presenta a nivel regional la evaluación de la calidad del agua para la cuenca del río Bogotá a una mayor resolución que la del ENA con información de la CAR.

En relación con el mercurio, se relacionan la información de plataformas que en la actualidad monitorean el uso de este en la actividad minera y los datos reportados por el Ejército de Colombia en términos de mercurio incautado. La carga potencial de mercurio al suelo y al agua (presentada en los ENA anteriores) no se estima en este Estudio, dado que en 2017 entró en vigor el Convenio de Minamata que prohíbe el uso de mercurio en la extracción legal de oro; por tanto, no están disponibles bases de datos oficiales actualizadas. Además, se reportan la demanda potencial nacional de agroquímicos en la agricultura desde 2008 hasta 2020 y el uso de plaguicidas en Colombia, usando los aportes y los resultados de las investigaciones e información del programa de Vigilancia epidemiológica de plaguicidas organofosforados y carbamatos (VEO) del Instituto Nacional de Salud para el periodo 2017-2021.

## Susceptibilidad al desabastecimiento hídrico en municipios

En este capítulo se actualiza el análisis de las afectaciones a los sistemas de abastecimiento de agua para la población a nivel municipal complementadas con las afectaciones por la ocurrencia de eventos que son producto de la temporada de lluvia. Para ambas temporadas, se muestra el consolidado de emergencias a nivel municipal para el periodo histórico 1998-2021, que efectivamente han ocasionado deficiencias en la prestación del servicio de acueducto. En esta versión 2022, se realiza una evaluación del nivel de recurrencia de dichas afectaciones para el periodo 2017-2021 y el tipo de área (urbana, rural o mixta) que ha presentado problemas de desabastecimiento. Se hace el análisis de la potencialidad de uso de aguas subterráneas para los municipios con mayor susceptibilidad al desabastecimiento en época seca.

Como complemento, se realiza la delimitación de cuencas abastecedoras de acueductos para 69 municipios de Colombia, tomando como referencia aquellos que abastecen más de 5000 suscriptores entre población rural y urbana. Para estas cuencas se estiman algunos de los indicadores del estudio, aquellos que permiten la resolución pertinente a este nivel de cuenca.

## Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) - Objetivo 6: agua limpia y saneamiento

En el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible comprometidos por el país, en este ENA se dedica un capítulo para resaltar la información que el Ideam —en especial desde los estudios nacionales del agua— aporta para los reportes de las metas e indicadores del ODS6 cuyo propósito es «Garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua y saneamiento para todos». Se hace un énfasis particular en las metas de calidad, usos del agua y gestión de los recursos hídricos.

## Afectaciones al régimen hídrico y al recurso agua

Las afectaciones al régimen hídrico y al recurso agua en las diferentes unidades de análisis se evalúan a partir del examen de la situación actual, de las tendencias y de los cambios con respecto a los resultados de los ENA 2010, 2014 y 2018.

Este análisis permite identificar aspectos temáticos que requieren especial atención y determinar las zonas del país donde se deben focalizar acciones a partir de los diferentes niveles de criticidad relacionados con: disponibilidad y calidad de agua, susceptibilidad al desabastecimiento para los municipios en época seca o de lluvia; tendencias y proyecciones de uso del recurso hídrico.

Aunque los temas de isotopía y aportes al ODS 6: agua potable y saneamiento no intervienen directamente en los análisis, sí suministran información relevante para tener presente en las evaluaciones del agua y la generación de estadísticas.



Crédito:
Sebastián González
Estuario río Guachaca, Palomino

CAPÍTULO 3

# DISPONIBILIDAD Y VARIABILIDAD DEL AGUA SUPERFICIAL EN COLOMBIA


**Autores:**

**IDEAM:**
**Análisis de indicadores y oferta hídrica superficial natural:**
Carolina Vega Viviescas
Fabio Andrés Bernal Quiroga

**Análisis de los eventos de sequía en Colombia:**
Jorge Andrés González Rojas
Julián David Urrea

**Dinámica de las inundaciones y características de cuerpos de agua lénticos:**
Carlos Albeiro Figueroa Ortiz
Fabio Andrés Bernal Quiroga
Nelsy Verdugo Rodríguez

**Evolución y dinámica de los glaciares y su relación con la alta montaña:**
Jorge Luis Ceballos Liévano
Yina Paola Nocua Ruge

**Fundación Natura Colombia:**
**Modelación ecohidrológica:**
Beatriz Hernández Castillo

# 3. Disponibilidad y variabilidad del agua superficial en Colombia

La disponibilidad del agua superficial en el país, así como su variabilidad, está referida a las condiciones de los flujos y procesos del ciclo del agua.

Este ciclo da cuenta de la secuencia de fases por las que el agua se transforma y se mueve entre la atmósfera y la Tierra, ya que es el modelo básico para entender el funcionamiento de los sistemas hídricos. En este, los procesos son impulsados sobre todo por la radiación solar y las fuerzas gravitacionales, en donde el agua de la atmósfera cae en forma de precipitación y se divide en el agua que escurre superficialmente, la que se infiltra y otra que regresa a la atmósfera por la evapotranspiración.

La evaluación del agua superficial se realiza a través del análisis de los indicadores de aridez y regulación hídrica; de la cuantificación y distribución de la oferta hídrica natural; de los eventos de sequía que han sucedido en el país y sus regiones; de la dinámica de las inundaciones, y de la evolución y dinámica de los glaciares y su relación con la alta montaña.

## 3.1 Análisis de indicadores y oferta hídrica superficial natural

La medición de las variables hidroclimáticas involucradas en el ciclo hidrológico es una de las fuentes de información más relevante en el estudio del agua. Para esta versión del ENA, se resaltan tres variables hidroclimáticas, las cuales se encuentran actualizadas para el periodo 1981-2021, a partir de varias bases de datos analizadas durante los últimos cuatro años. Estas variables corresponden, principalmente, a la precipitación, la temperatura, el caudal y la evapotranspiración, tanto potencial como real, las cuales constituyen insumo para los temas desarrollados de balance hídrico y variabilidad hidroclimática. La fuente de estas variables se presenta a continuación:

**Precipitación.** En formato distribuido, proviene del conjunto de datos de precipitación global CHIRPS: «Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations» (Funk et al., 2015), porque incorpora imágenes satelitales de resolución espacial de 0,05° corregido con datos de estaciones en tierra para crear mapas diarios de lluvia, disponibles desde 1981. Además, sobre el producto original, dentro del Instituto se realiza una revisión y corrección en áreas del país en donde se encuentran grandes diferencias con las estaciones de la Red Nacional de Monitoreo.

**Temperatura.** Proveniente de los registros diarios de 549 estaciones convencionales de la Red Nacional de Monitoreo. Los valores puntuales fueron llevados de manera virtual a una altura de 0 metros sobre el nivel del mar, con un modelo de regresión lineal diario por estación; se interpolaron con el método de la distancia inversa ponderada (IDW, por sus siglas en inglés) y se llevaron a la altura real con el uso del Modelo Digital de Terreno de la misión SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) (NASA, 2013) de 30 m del país, obteniendo mapas históricos diarios de resolución de 0,05°.

**Caudal.** Medido de forma puntual en 528 estaciones hidrológicas de la Red Nacional de Monitoreo. A partir de estas, se construyeron dos variables adicionales que complementan los insumos para analizar los flujos o movimientos del agua dentro del ciclo hidrológico:

1. Evapotranspiración potencial: a partir de los mapas diarios de temperatura se aplicó la ecuación modificada de Hargreaves (1994), en la que se adecuaron las constantes para que se ajustaran mejor a las características del territorio nacional.

$$ETP = 0.00216\,(T_{mean} + 17.78) R_o (T_{máx} - T_{mín})^{0.47}$$

Donde:
**ETP:** evapotranspiración potencial (mm)
***Tmín – media – máx:*** temperatura mínima, media y máxima (°C)
**Ro:** radiación extraterrestre expresada en evaporación equivalente (mm)

2. Evapotranspiración real: estimada con la ecuación de Budyko (1974), la cual transforma los valores potenciales a reales a partir de un balance hídrico anual. Dada las suposiciones del autor, esta variable solo se cuantifica a resolución anual para los cálculos multianuales.

$$ETR = \sqrt[2]{\left(ETP * P * \tanh\frac{P}{ETP}\right) * \left(1 - \cosh\frac{ETP}{P} + \sinh\frac{ETP}{P}\right)}$$

Donde:
**ETR:** evapotranspiración real (mm/año)
**ETP:** evapotranspiración potencial (mm/año)
**P:** precipitación (mm/año)

Las series históricas distribuidas de las variables mencionadas como insumos permiten evaluar las fases del ciclo hidrológico tanto en condiciones promedio como su evolución temporal. Para el primer caso, se calculan dos indicadores que evalúan las condiciones hídricas naturales del país: el *índice de aridez* (IA), que muestra la relación entre la disponibilidad de agua y la energía para la evapotranspiración requerida naturalmente; y el *índice de regulación hídrica* (IRH), el cual permite inferir las condiciones del régimen natural de la cuenca.

Dentro del ciclo del agua, el volumen que se aprecia con más facilidad es aquel que escurre de forma superficial desembocando en ríos y arroyos delimitados por las cuencas hidrográficas; esta cantidad es denominada *oferta hídrica*. Esta variable es estimada con un balance hidrológico en varias escalas temporales: las características medias son evaluadas en la *oferta hídrica total multianual de año medio*; y las condiciones extremas esperadas con la *oferta hídrica total multianual de año seco y húmedo*. Así mismo, se realiza un estimado de la *oferta hídrica disponible multianual*, es decir, el agua que se podría usar sin afectar los ecosistemas; y, por último, se evalúa la variación temporal de esta misma variable con la *oferta hídrica total histórica*.

## 3.1.1 Indicadores hídricos superficiales

Las características de la oferta hídrica natural dependen de la congregación de varios factores, principalmente climáticos y geográficos; es decir, de la interacción de las características orográficas y la cobertura de la tierra con las variables hidroclimáticas, estableciendo diferentes capacidades de almacenamiento y regulación. Estas condiciones se sintetizan en los índices de aridez y regulación hídrica que relacionan elementos meteorológicos e hidrológicos, y permiten describir el comportamiento general de la oferta hídrica resultante.

### 3.1.1.1 Índice de aridez

La aridez es un fenómeno climático que describe la escasez de agua sobre un territorio determinado, entendiendo el suministro como la precipitación promedio (P), la evapotranspiración potencial (ETP) como el agua requerida por el ecosistema y la evapotranspiración real (ETR) como el resultado del balance que efectivamente tiene la región. De esta manera, el Índice de aridez (IA) es un indicador simple pero efectivo que caracteriza los déficits hídricos naturales de largo plazo, el cual es entendido como una relación entre la ETP y la ETR, como lo indica la siguiente expresión:

$$IA = \frac{ETP - ETR}{ETP}$$

Donde:
**IA:** índice de aridez (-)
**ETP:** evapotranspiración potencial (mm/año)
**ETR:** evapotranspiración real (mm/año)

Esta relación clasifica el clima regional de acuerdo con la disponibilidad de agua para el sostenimiento de los ecosistemas; es evaluada de forma cualitativa y clasifica las regiones en siete categorías: desde altamente deficitario hasta altos excedentes de agua, como se indica en la Tabla 9.

Tabla 9. Categorías del índice de aridez.

| Categoría | Rango |
|---|---|
| Altamente deficitario de agua | >0,60 |
| Deficitario de agua | 0,50 - 0,59 |
| Moderado a deficitario de agua | 0,40 - 0,49 |
| Moderado | 0,30 - 0,39 |
| Moderado a excedentes de agua | 0,20 - 0,29 |
| Excedentes de agua | 0,15 - 0,19 |
| Altos excedentes de agua | <0,15 |

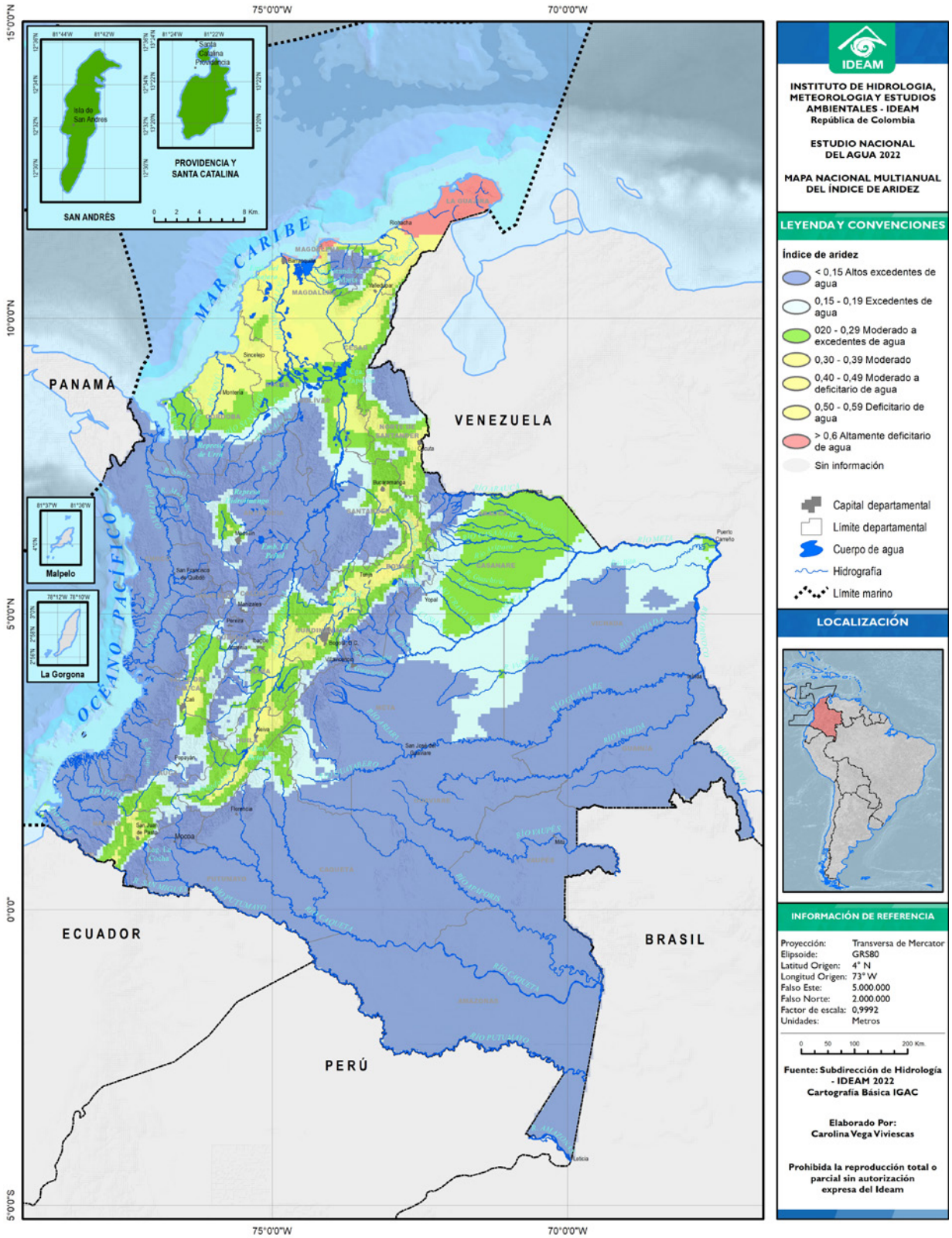



Figura 12. Mapa del índice de aridez en Colombia.

Los resultados del IA se presentan en la Figura 12, y reafirman que el país cuenta con una gran riqueza hídrica, ya que cerca del 90 % del territorio se cataloga entre moderado a altos excedentes de agua. Sin embargo, se resalta el norte, desde los departamentos de Córdoba, Sucre y Norte de Santander hasta La Guajira, ya que, con excepción de la Sierra Nevada de Santa Marta, es la zona dónde se concentran las áreas deficitarias en términos hídricos, lo que hace a esta región mucho más vulnerable a la degradación. Además, en la parte más alta de las cordilleras, alrededor de las grandes ciudades como Medellín, Bucaramanga, Tunja, Bogotá, Neiva y Cali, se reconocen zonas con déficits en la categoría de moderado a deficitario.

En términos de la zonificación hidrográfica (Figura 13), se observa que las zonas deficitarias se encuentran exclusivamente en las áreas hidrográficas del Caribe y Magdalena-Cauca, en contraste con las áreas de Pacífico, Orinoco y Amazonas en las cuales más del 70 % del territorio cuenta con altos excedentes hídricos. De la misma manera, en el Orinoco destacan las cuencas de los ríos Arauca, Casanare y parte baja del río Meta, en donde la disponibilidad de agua en relación con los requerimientos ecosistémicos se reduce en comparación con el resto de la región. Los resultados del IA por subzona hidrográfica para todo el país se presentan en el **Anexo 2 -Indicadores hídricos.**

Dado que el índice de aridez es una característica del clima, su actualización en las diversas versiones del ENA ha variado solo de acuerdo con las mejoras en calidad y resolución de los insumos meteorológicos, identificando consistentemente las áreas propensas a la desertificación y a la degradación de los recursos de suelo y agua. Eso hace del IA una herramienta importante para resaltar estas áreas y priorizarlas para la elaboración de estrategias de conservación y de desarrollo compatibles con los recursos disponibles.

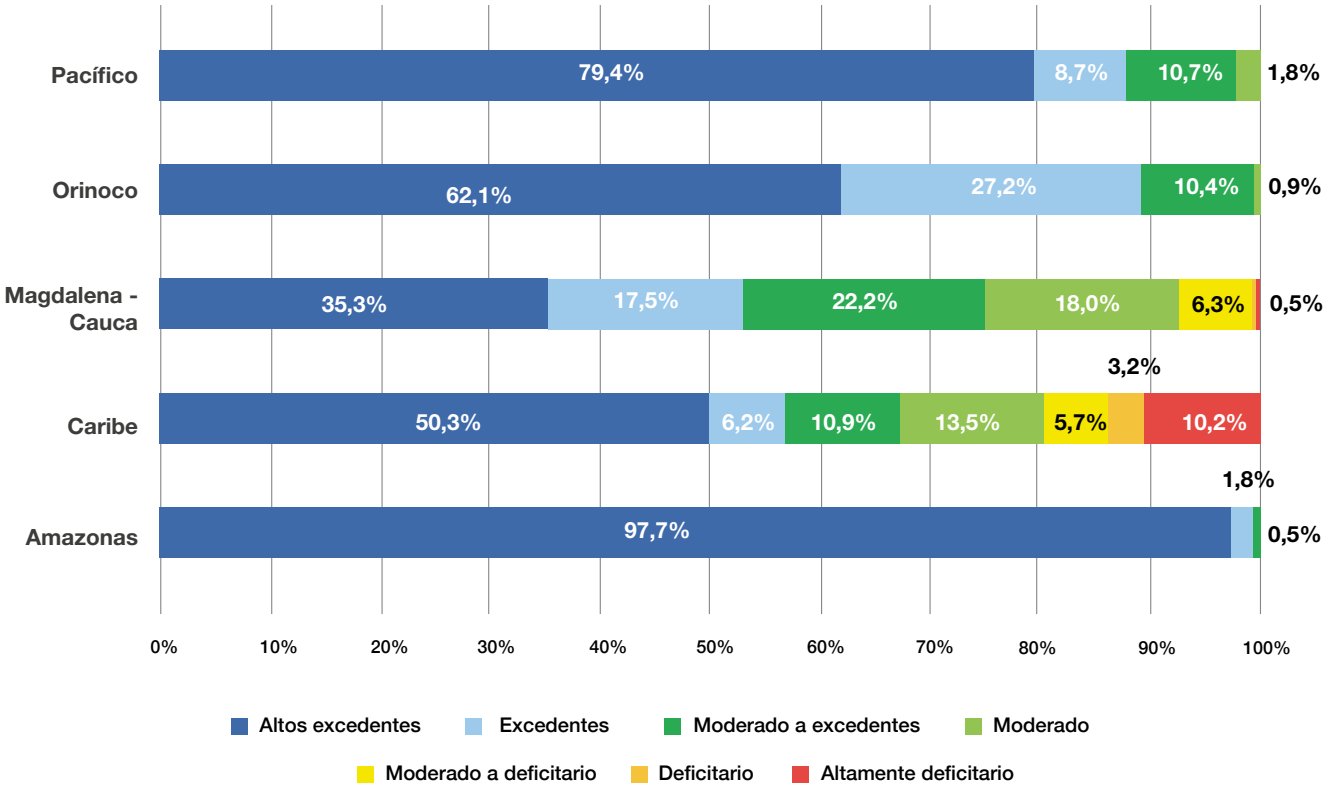



Figura 13. Distribución del índice de aridez por área hidrográfica.

### 3.1.1.2 Índice de regulación hídrica

El índice de regulación hídrica (IRH) evalúa la capacidad de la cuenca para mantener y regular un régimen de caudales, la cual está limitada por la interacción del sistema suelo-vegetación (características físicas y morfométricas de la cuenca). Su definición se hace con respecto a la *curva de duración de caudales medios diarios* (CDC) que presenta una relación del porcentaje de tiempo durante el cual los caudales igualan o exceden un valor dado. La forma y pendiente de la CDC indica los tiempos de duración de un caudal en un cauce y la relación de áreas bajo la curva define su regulación acorde con la siguiente ecuación y su representación gráfica en la Figura 14.

$$IRH = \frac{V_p}{V_t}$$

Donde:
**IRH:** índice de regulación hídrica
$V_p$: volumen representado por el área que se encuentra bajo la línea de caudal medio en la CDC
$V_t$: volumen total equivalente al área bajo la CDC

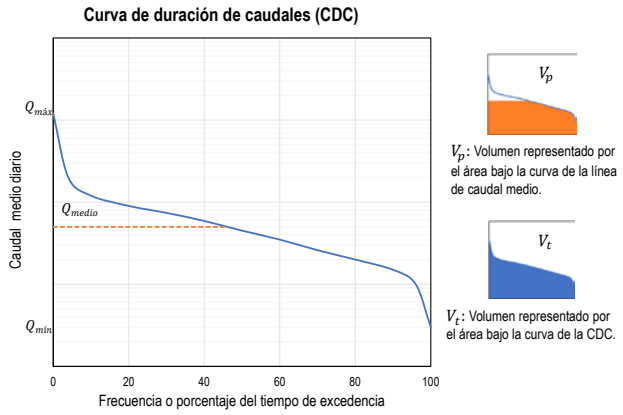



Figura 14. Esquematización de la curva de duración de caudales y los volúmenes para el cálculo del IRH.

El IRH se calcula a partir de las CDC; por tanto, se define como un evaluador de la capacidad de regulación de una cuenca, calculado de forma puntual en las estaciones hidrológicas. Sin embargo, para propósitos del estudio y evaluación a nivel nacional, su representación es espacial, a escala de subzona hidrográfica. Para esto se asignó una estación de referencia a cada subzona; y en aquellas subzonas no instrumentadas, se regionalizaron los resultados de las CDC para indicar la tendencia de regulación de áreas instrumentadas y no instrumentadas.

Para el proceso de regionalización en el ENA 2018 (Ideam, 2019) se delimitaron 16 regiones homogéneas para el país como áreas que comparten características climatológicas, fisiográficas o hidrológicas similares (Ravazi y Coulibaly, 2013). Sobre estas regiones se aplicó la metodología descrita por Krasovskaia et al. (2006), en la que —a partir de las series históricas de caudal en la región homogénea— se hace un promedio de todas las CDC estándar adimensionales (afectadas por el caudal medio) de las estaciones disponibles para obtener una única curva para región, la cual es asignada en las subzonas que no tienen una estación de referencia.

Por último, los valores del IRH de cada subzona hidrológica son clasificados de forma cualitativa de acuerdo con la escala presentada en la Tabla 10.

Tabla 10. Categorías del índice de regulación hídrica.

| Categoría | Rango |
|---|---|
| Muy alta | > 0,85 |
| Alta | 0,75 - 0,85 |
| Moderada | 0,65 - 0,75 |
| Baja | 0,50 - 0,65 |
| Muy baja | ≤ 0,50 |

Como se ha explicado antes, los indicadores ambientales relacionados únicamente con el sistema climático no presentan gran variación en las diferentes versiones del ENA, ya que, a pesar de la actualización del periodo de referencia, los indicadores muestran las condiciones multianuales que sirven de referencia para cambios de largo plazo generados por la presión demográfica, cambios de uso de suelo y cambio climático. Además, el cálculo del IRH está limitado a la cantidad de estaciones hidrológicas con un buen registro de caudales diarios y una curva de gasto actualizada con aforos sistemáticos anuales.

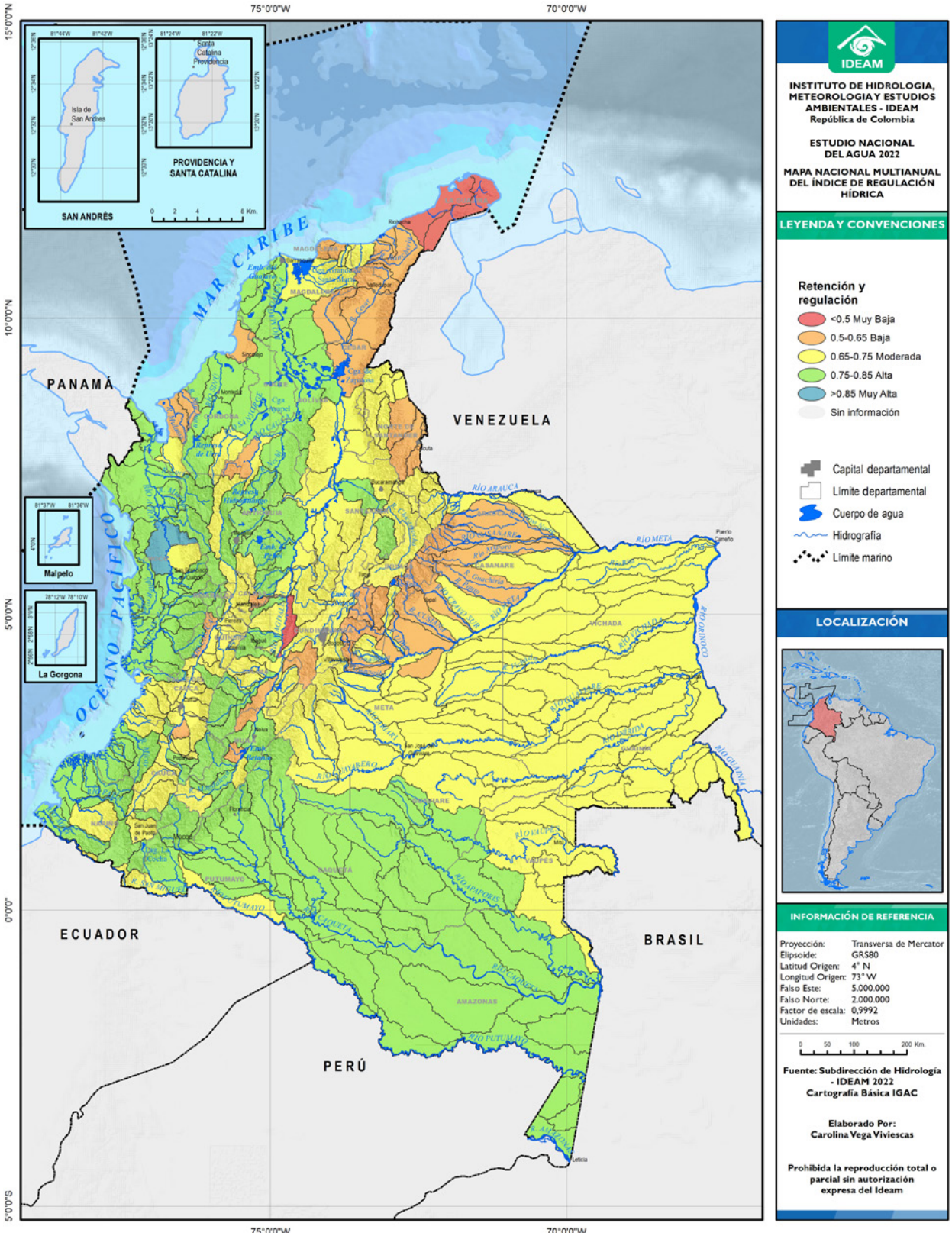



Figura 15. Mapa del índice de regulación hídrica en Colombia.

De acuerdo con lo anterior, y dado que no se ha aumentado la disponibilidad de estaciones hidrológicas, los resultados del IRH presentados en la Figura 15 son semejantes a los presentados en la anterior versión del estudio. Concentran una alta regulación en el 40,5 % del territorio nacional (Figura 16), específicamente en las regiones del Amazonas, Pacífico, Atrato y la cuenca baja del río Cauca, que se encuentra regulada por un sistema de embalses y en su encuentro con el río Magdalena predominan los sistemas cenagosos que promueven una buena regulación.

En contraste, las regulaciones moderadas se concentran en las cuencas del Orinoco, cuenca alta del río Cauca, cuenca media del río Magdalena y en el Catatumbo. Son de especial relevancia las cuencas de la Alta Guajira, los ríos Cesar, Tarazá, Seco, Sumapaz, Casanare y las cuencas de la parte alta del río Meta (ríos Guamal-Humadea, Guatiquía, Guacavia, Humea, Guavio, Lengupá, Upía y Cusiana).

En los análisis por subzona hidrográfica en particular, los valores del IRH únicamente presentaron cambios en cinco subzonas con respecto a los valores presentados en el 2018. Sin embargo, estos no obedecen a cambios relevantes en la regulación de la escorrentía, tasa de infiltración o almacenamiento de estas cuencas, sino a ligeras diferencias en la aproximación decimal y, por tanto, en la categorización del indicador. Estas subzonas son las de los ríos Guachaca, Mendihuaca y Buritaca en el Caribe, con una regulación baja; y las de los ríos Cucuana, Arma, Casanare y Cravo Norte con una regulación moderada. Los resultados completos del IRH por subzona hidrográfica se presentan en el **Anexo 2.**

Teniendo en cuenta los anteriores resultados, la gestión adecuada de la tierra puede ser un enfoque eficaz para mejorar la regulación de la cantidad de agua, por lo cual el IRH es de gran utilidad para enfocar la priorización de estas acciones.

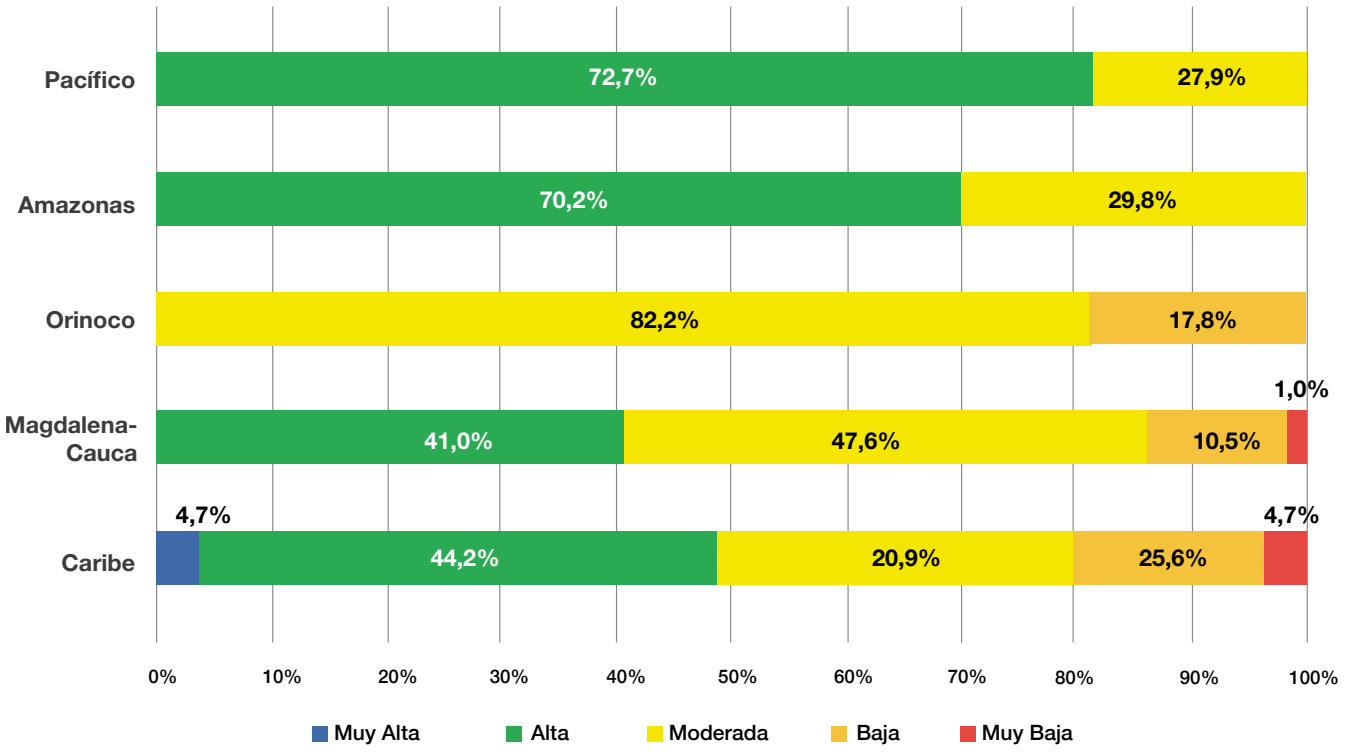



Figura 16. Distribución del índice de regulación hídrica a nivel de área hidrográfica.

### 3.1.2 Oferta hídrica superficial

El concepto de oferta hídrica puede ser multidimensional, si solo aborda la condición natural hidrológica e hidrogeológica o si incluye análisis de calidad y su relación socioeconómica en la región de análisis. Este capítulo se centra en la estimación de la *oferta hídrica total superficial* (OHTS) natural, es decir, sin influencia humana dentro del marco del ciclo natural del agua, representado matemáticamente por un balance hídrico cuyos principios básicos son los de conservación de masa y energía.

La importancia de esta variable debe analizarse desde tres perspectivas: (1) espacial, dada su distribución heterogénea en el territorio nacional; (2) temporal, ya que, dadas las condiciones de variabilidad natural, no se dispone de la misma oferta todos los meses del año, ni todos los años; y (3) en la escala de análisis: ya que los órdenes de magnitud y variabilidad pueden diferir dependiendo del tamaño de la cuenca analizada. Por lo anterior, es necesario recordar que los resultados del ENA corresponden a evaluaciones en tres niveles jerárquicos de análisis espacial: áreas, zonas y subzonas hidrográficas, por lo que no se deben asociar los resultados a cuencas de menor tamaño, ni mezclar las escalas temporales trabajadas.

La OHTS es calculada en términos de escorrentía superficial de forma distribuida (mapas de resolución de 0,05°) para el territorio continental nacional bajo dos aproximaciones que son la multianual y la histórica, y cuyos resultados incorporan tres tipos de incertidumbre: la natural de la medición de las variables de insumo, la asociada al porcentaje de cobertura del monitoreo y la correspondiente a los modelos aplicados. Dichos valores de escorrentía son afectados por el área para calcular el volumen de agua en la zona estudiada, por lo cual la actualización de la zonificación hidrográfica presentada en el capítulo 2 tiene una influencia en los valores de OHTS calculados en los niveles de área, zona y subzona hidrográfica, donde hay cambios representativos.

#### 3.1.2.1 Oferta hídrica total superficial multianual

La OHTS multianual corresponde a un cálculo promedio o de largo plazo en una base anual cuyo periodo de actualización corresponde a 1991-2020, coincidente con la actual normal climatológica definida por la OMM. En este caso, dentro del balance hídrico puede considerarse que no hay abstracciones significativas y que el cambio del almacenamiento de agua es nulo (Zhang et al., 2008); por ello, la escorrentía es igual a la precipitación menos la evapotranspiración real en la unidad de análisis.

$$Esc = P - ETR$$

Donde:
**Esc:** escorrentía superficial (mm/año)
**P:** precipitación (mm/año)
**ETR:** evapotranspiración real (mm/año)

Inicialmente, este balance es realizado con los valores anuales medios (calculados con la mediana estadística) de las variables de entrada, correspondientes a una condición de «Año medio», cuyos resultados son corroborados y corregidos de acuerdo con los datos observados del valor medio anual de caudal en las estaciones hidrológicas (mediana estadística), transformados a escorrentías usando la relación caudal área. Los valores mensuales multianuales son estimados a partir de la metodología de factores ponderadores presentada en el ENA 2018 (Ideam, 2019) dadas las suposiciones de largo plazo.

##### Año medio

El año medio es una condición teórica definida por los valores medios multianuales (promedio de la serie histórica) de la variable analizada, en este caso la OHTS en términos de escorrentía. El mapa anual de OHTS multianual de año medio se presenta en la Figura 17, el cual indica en el orden nacional una oferta hídrica de 1963 km³, los cuales fluyen con un rendimiento hídrico de cerca de 54,7 l/s/km², equivalentes a una escorrentía promedio de 1721 mm; es decir, que cerca del 61,3 % de la precipitación que cae en el país escurre superficialmente por laderas y planicies hasta su concentración final en pequeños cauces, canales y ríos.

En la Tabla 11 se presenta la distribución por área hidrográfica de las variables hidrológicas relacionadas con la OHTS multianual de año medio y, en general, el volumen de agua superficial que fluye

durante un año en el territorio nacional; es decir, no tiene en cuenta aguas transfronterizas superficiales que atraviesan o están situadas en las fronteras con otros países. Estas variables son indicadores del comportamiento natural de las diferentes regiones; se resalta que, aunque la mayor disponibilidad de agua en volumen se encuentra en el Amazonas y en el Orinoco, no son estas regiones las que tienen el mayor rendimiento hídrico. La mayor cantidad de agua que fluye por unidad de área (rendimiento hídrico) se encuentra en el Pacífico, dado su régimen natural de lluvia.

Tabla 11. Variables medias multianuales de oferta hídrica por área hidrográfica para el periodo 1991-2020.

| Área hidrográfica | | Área ($km^2$) | Escorrentía (mm) | Oferta total ($Mm^3$) | Caudal medio ($m^3/s$) | Rendimiento ($l/s/km^2$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Caribe | 102.768 | 1825 | 187.513 | 5946 | 57,9 |
| 2 | Magdalena - Cauca | 270.872 | 975 | 263.986 | 8371 | 30,9 |
| 3 | Orinoco | 346.099 | 1504 | 520.507 | 16.505 | 47,7 |
| 4 | Amazonas | 341.567 | 3565 | 714.758 | 22.665 | 66,4 |
| 5 | Pacífico | 77.386 | 2093 | 275.862 | 8748 | 113,0 |

Las mejoras en escala de la zonificación hidrográfica suponen una afectación en los valores de OHTS en volumen, pero no de escorrentía en aquellas sub-zonas que tuvieron cambios relevantes en su área. Este es el caso de las subzonas: 1115 ríos Tanela y otros directos al Atrato; 2303 directos al Magdalena entre el río Seco y el río Negro; 2630 ríos Lilí, Meléndez y Cañaveralejo, donde se encuentra la ciudad de Cali; 4102 medio río Guainía y 4107 directos río Negro.

La representación espacial de la escorrentía anual multianual de año medio se muestra en el mapa de la Figura 17. De los análisis por subzona hidrográfica, vale la pena resaltar las cuencas de la Alta Guajira, del Caribe litoral (como los ríos Mulatos, San Juan y Canalete), el río Cesar, el alto y bajo Magdalena, ya que es en donde se encuentran las subzonas con menor disponibilidad hídrica con valores de escorrentía media inferiores a 500 mm al año. En contraste, las cuencas localizadas en las regiones del Atrato, Baudó, Tapaje y Dagua son aquellas que cuentan con la mayor disponibilidad de agua a nivel nacional, con valores de escorrentía en un año medio de más de 4000 mm al año.

Además, hay dos subzonas cuyos cambios en la estimación de la OHTS vale la pena resaltar: la primera, es 1501 río Piedras y río Manzanares, en donde se encuentra la ciudad de Santa Marta, cuyas características naturales hacen que tenga una oferta hídrica mucho más baja que las cuencas vecinas, con una escorrentía media de apenas 446 mm frente a los promedios de más de 1100 mm en cuencas como el río Ancho y Don Diego. Por otra parte, en la subzona 3701 río Chitagá, se observa un incremento de la OHTS frente a la presentada en las versiones pasadas del ENA; esto no se debe a un cambio en la dinámica de la cuenca, sino a que esta subzona, además del río Chitagá, también incluye el río Valegrá, que esta vez fue tenido en cuenta en la estimación de la oferta hídrica.

La disponibilidad varía temporalmente de acuerdo con el régimen hidrológico de cada región. La variación se muestra en la Figura 18, en donde se identifica un periodo de menor escorrentía en los meses de diciembre a marzo en gran parte del país, con excepción de la región del Pacífico. De la misma manera, se observa un aumento considerable durante el trimestre de mayo a julio, en particular en el Amazonas y el Orinoco.

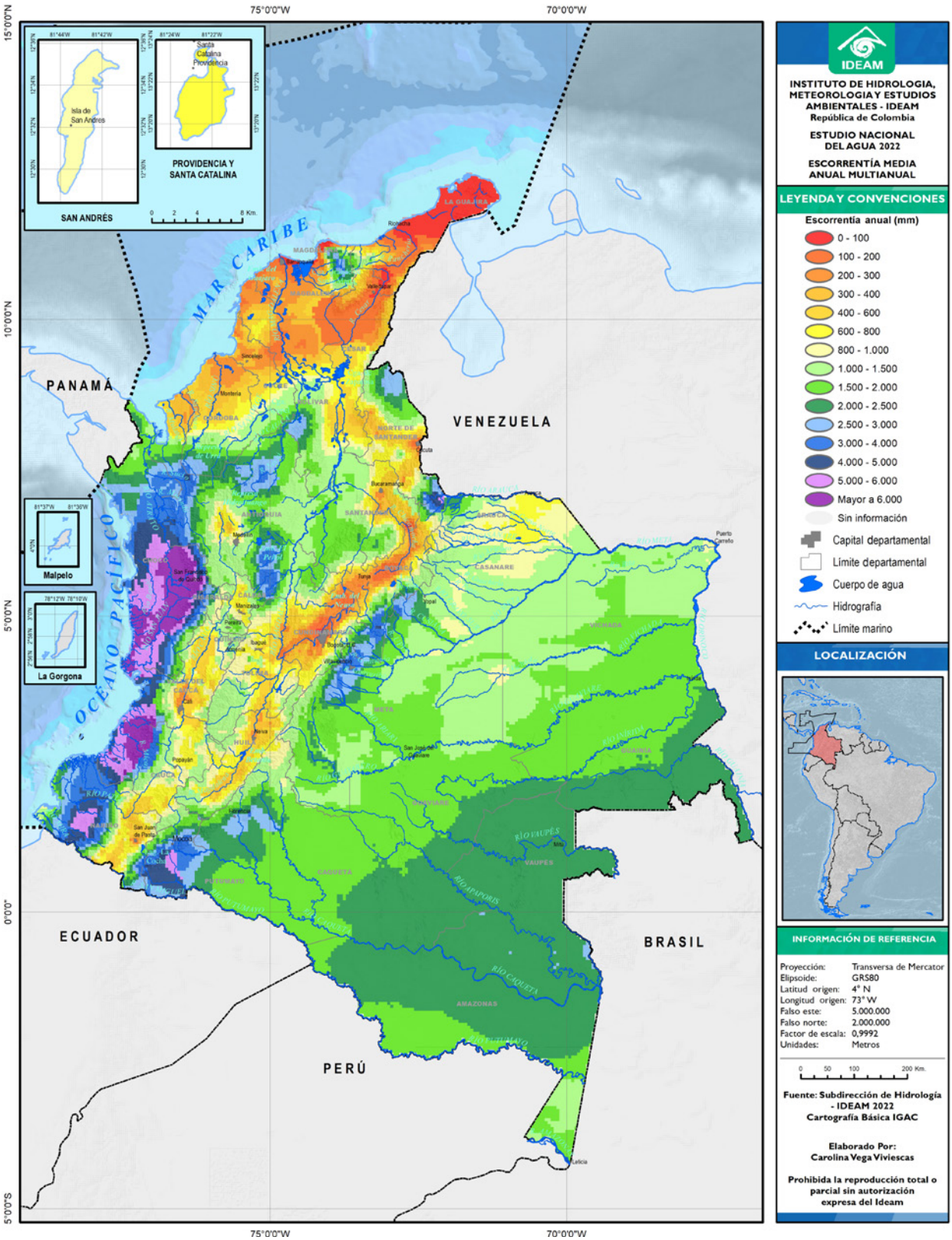



Figura 17. Mapa nacional de escorrentía anual multianual de año medio.

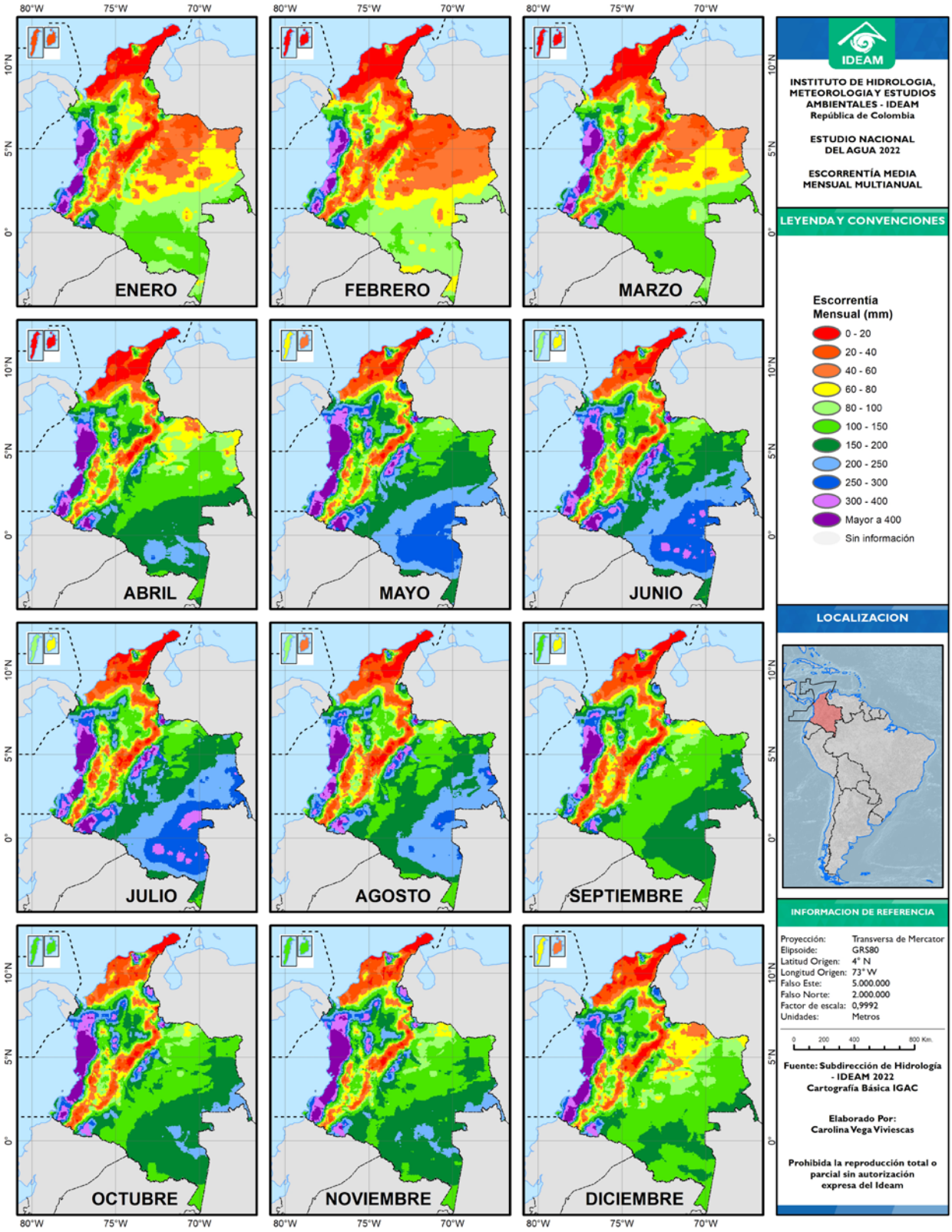



Figura 18. Mapas nacionales de escorrentía mensual multianual de año medio.

Bajo la misma hipótesis de balance de largo plazo, se evalúan dos condiciones temporales teóricas para conocer las características extremas de la variabilidad hidrológica en el país. Estas condiciones se denominan «año seco» y «año húmedo», y aunque no corresponden a un año específico, por estadística representan las condiciones extremas de un periodo continuo de enero a diciembre, asignándoles los valores mínimos y máximos multianuales, respectivamente.

Estos años teóricos son estimados a partir de las series históricas de caudales del periodo 1981-2021, siguiendo la metodología de factores ponderadores presentada en el ENA 2018 (Ideam, 2019), en donde en cada estación hidrológica se calcularon los caudales mínimos y máximos mensuales multianuales, los cuales se transformaron a volúmenes. Estos valores son afectados por los volúmenes de año medio, calculando así unos factores ponderadores que son interpolados para los cálculos distribuidos. En las siguientes secciones se presentan los resultados encontrados para estas condiciones.

### Año seco

En la Figura 19 se presenta el mapa de escorrentía para la condición teórica de año seco, en la cual la oferta se ve reducida en un 58 % con un promedio nacional de apenas 726 mm anuales, siendo más intensa la reducción en las áreas hidrográficas Caribe y Magdalena - Cauca, específicamente en la región del golfo de Morrosquillo, el río Cesar, la Alta Guajira, las cuencas del Alto Magdalena y la cuenca del río Sogamoso. De la misma manera, a pesar de representar los mínimos extremos, se identifica que en las regiones del Amazonas y Pacífico se conservan escorrentías superiores a los 900 mm anuales.

Esta variación se observa con más detalle en los mapas mensuales de año seco presentados en la Figura 20, donde se observan importantes disminuciones en las cuencas del piedemonte llanero, con valores de escorrentía muy bajos entre los meses de enero a abril.

Para tener en cuenta estos resultados en escenarios de planificación y gestión del recurso hídrico, se debe considerar el análisis por subzona hidrográfica ya que, por ser una condición teórica, es improbable que estos efectos se presenten simultáneamente en todo el territorio nacional. Sin embargo, sí expresan la vulnerabilidad localizada en condiciones secas que puede darse por fenómenos recurrentes de variabilidad natural o incluso ser más extremos a largo plazo.

### Año húmedo

El mapa de escorrentía anual de año húmedo se presenta en la Figura 21, donde se muestra un aumento de escorrentía del 122 %, con un promedio nacional de 3818 mm anuales; los mayores cambios se presentan en las cuencas de la Alta Guajira, río Cesar, el Catatumbo, río Casanare, cuenca alta del río Meta (ríos Metica, Guayuriba, Guatiquía y Guacavía, Humea, Guavio, Lengupá, Upía y Cusiana) y la parte media del río Magdalena, en la región de los ríos Prado, Cabrera y Sumapaz.

No obstante, la predominancia de altos valores de OHTS en este análisis, en las cuencas de los ríos Bogotá, Chicamocha, Cesar y Sinú, así como en las regiones del Catatumbo, Bajo Magdalena y Alta Guajira, se estiman valores de escorrentía anual de menos de 500 mm al año. Se resalta la vulnerabilidad de algunas ciudades como Bogotá D. C., Tunja, Bucaramanga, Cúcuta, Montería, Sincelejo, Cartagena, Barranquilla, Santa Marta, Valledupar y Riohacha, localizadas en estas áreas.

Estos incrementos también se distribuyen de manera heterogénea a lo largo del año, como se ilustra en los mapas mensuales presentados en la Figura 22, en los cuales se observa una mayor afectación en los meses más húmedos de la condición de año medio, es decir, el periodo de abril a agosto.

Los resultados de la OHTS multianual en las tres condiciones hidrológicas analizadas se presentan a nivel de subzona hidrográfica en el **Anexo 1.**

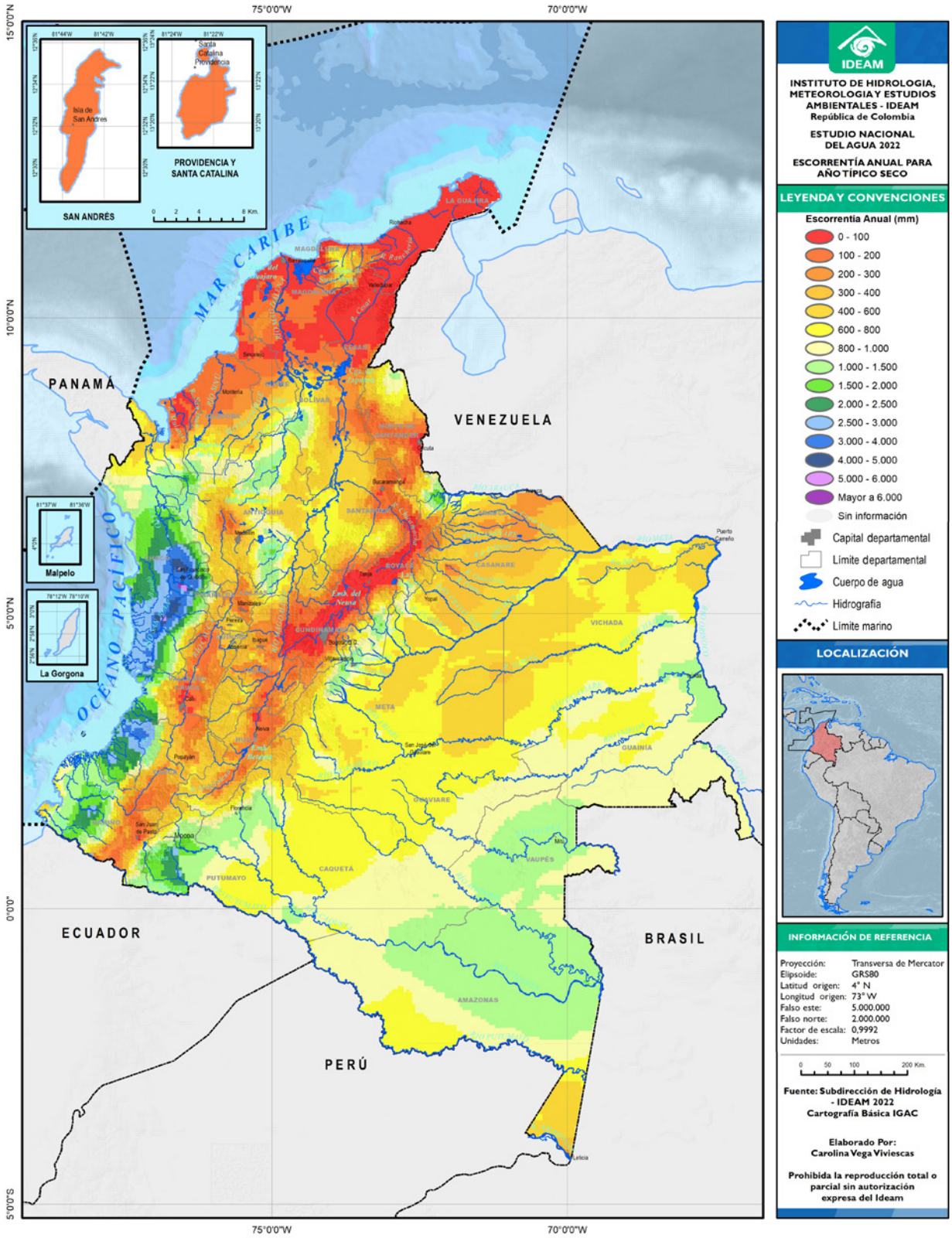



Figura 19. Mapa nacional de escorrentía anual multianual de año seco.

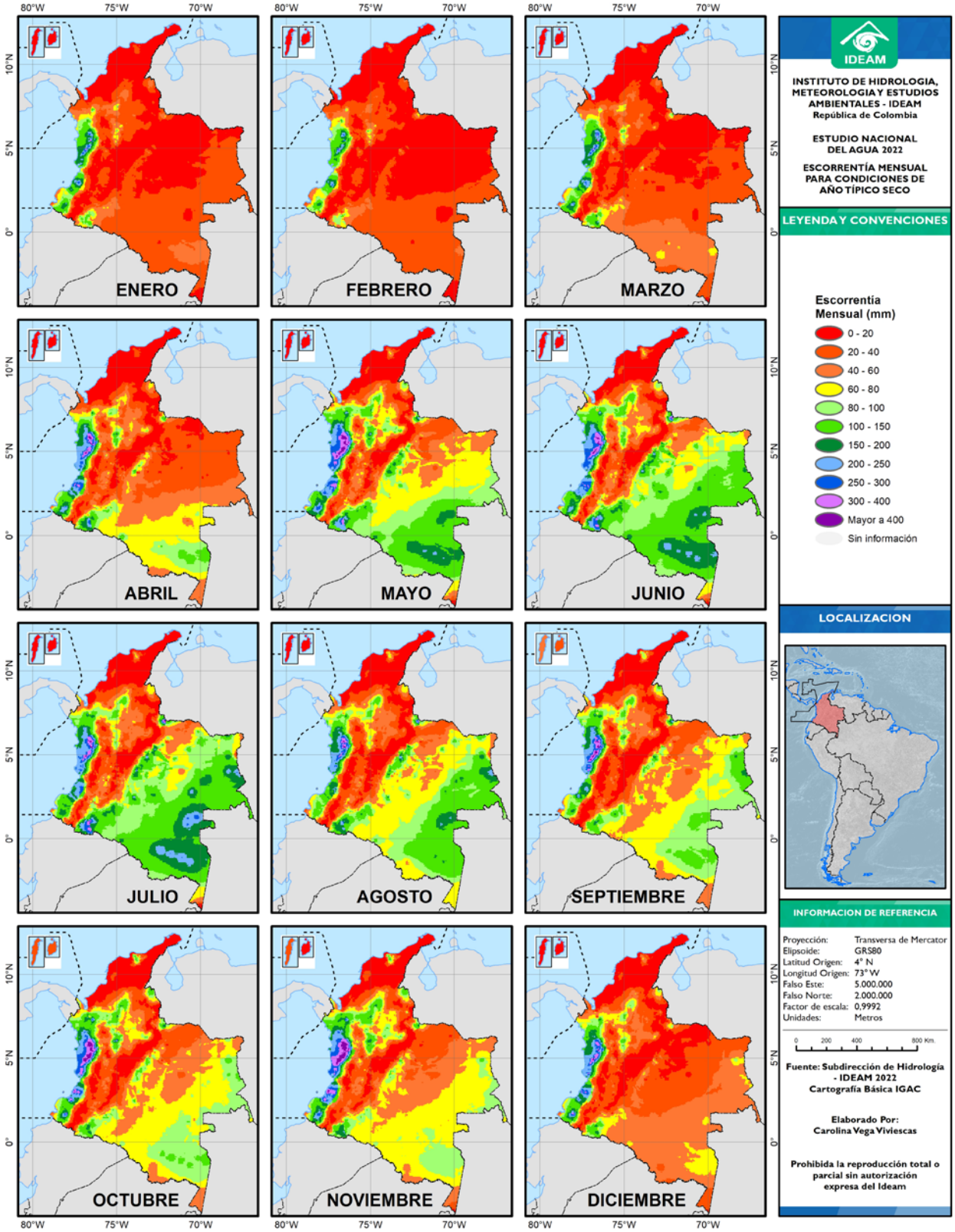



Figura 20. Mapas nacionales de escorrentía mensual multianual de año seco.

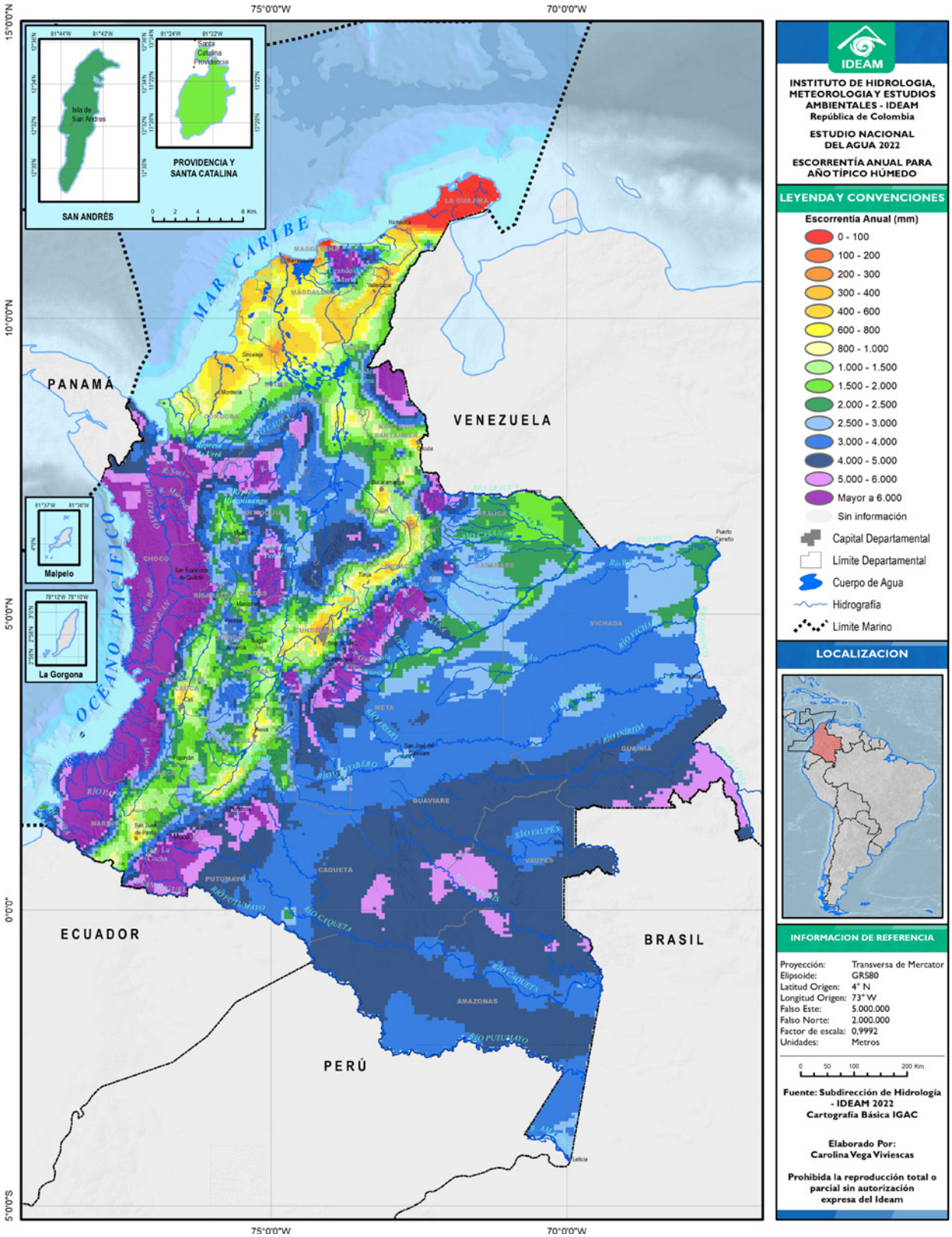



Figura 21. Mapa nacional de escorrentía anual multianual de año húmedo.

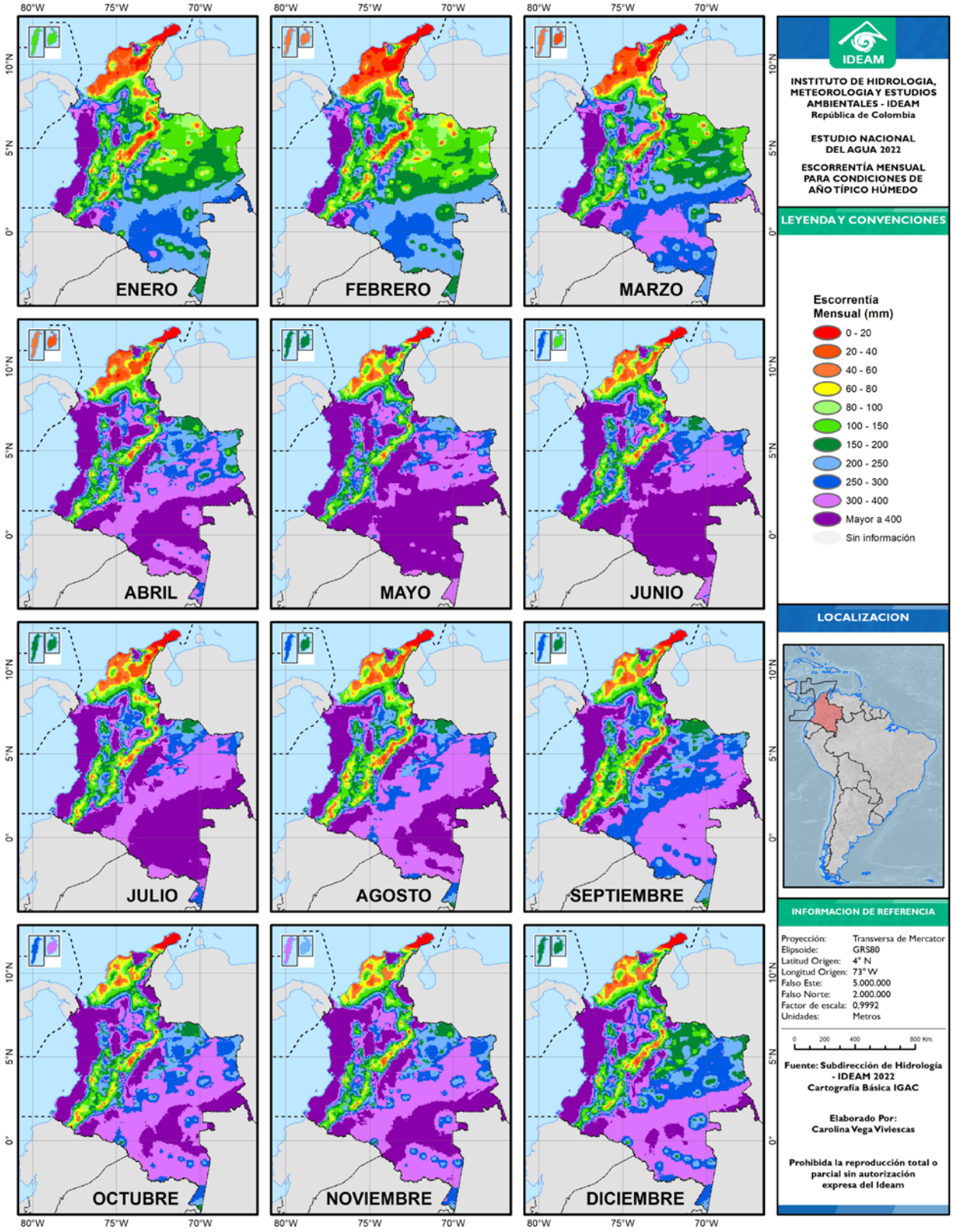



Figura 22. Mapas nacionales de escorrentía mensual multianual de año húmedo.

### 3.1.2.2 Oferta hídrica disponible multianual

La *oferta hídrica disponible* (OHD) multianual se calcula para tener un estimado del volumen de agua que podría usarse con fines antrópicos sin afectar el funcionamiento de los ecosistemas, los sistemas fluviales y los usuarios aguas abajo de las fuentes hídricas estudiadas. Este volumen de agua es una parte de la OHTS, y se determina a partir de la curva de duración de caudales medios diarios (CDC) y el índice de regulación hídrica (IRH), estableciendo dos condiciones: (1) subzonas con alta regulación, correspondientes a aquellas con un IRH superior a 0,7; y (2) subzonas con regulación moderada a baja, identificadas por tener un IRH inferior a 0,7.

Una vez clasificada la condición, el valor de caudal mínimo requerido para la no afectación de una subzona hidrográfica se calcula como un percentil de la CDC en las cuencas con alta regulación se asigna el percentil 75 y, en el caso contrario, el percentil 85. Este caudal es transformado a unidades de escorrentía superficial y la OHD será el resultado de sustraer este valor a la OHTS multianual, correspondiente a los años teóricos seco, medio y húmedo. En aquellas subzonas hidrográficas donde no se cuenta con una estación hidrológica para el cálculo directo de la CDC se aplicó la metodología de regionalización descrita en la sección 3.1.1.

Los resultados de la OHD de año medio por área hidrográfica corresponden a la suma de los valores por subzona y se presentan en la Tabla 12. En esta tabla se destaca que la OHD está entre el 50 % y el 70 % de la OHTS, y la mayor cantidad de oferta se concentra en el Amazonas y el Orinoco, en particular, en las subzonas asociadas a los ríos Inírida, Guaviare, Vaupés, Apaporis, Cahuinarí, Caquetá, Putumayo e Igara Paraná que superan los 15.000 Mm³/año.

Por otro lado, las subzonas asociadas a los ríos Camarones, Timaná. Juncal, Desbaratado, Lilí, Meléndez, Cañaveralejo y Cali, así como la Alta Guajira, la ciénaga de Mallorquín y el lago de Tota tienen valores de OHD inferiores a los 100 Mm³/año. Los resultados completos de OHD multianual en las tres condiciones hidrológicas analizadas se presentan a nivel de subzona hidrográfica en el **Anexo 2.**

Tabla 12. Oferta hídrica disponible de año medio por área hidrográfica para el periodo 1991- 2020.

| Área hidrográfica | | Área (km²) | Oferta disponible (Mm³) |
|---|---|---|---|
| 1 | Caribe | 102.768 | 93.922 |
| 2 | Magdalena - Cauca | 270.872 | 151.014 |
| 3 | Orinoco | 346.099 | 379.896 |
| 4 | Amazonas | 341.567 | 415.903 |
| 5 | Pacífico | 77.386 | 147.226 |

### 3.1.2.3 Oferta hídrica total superficial histórica

La oferta hídrica superficial histórica describe la variación de la disponibilidad hídrica en el tiempo y es estimada a través de la aplicación del modelo hidrológico Dynamic Water Balance DWB (Zhang et al., 2008), obteniendo mapas diarios de escorrentía superficial que permiten entender los efectos hidrológicos de la variabilidad natural, así como articular los procesos de transformación antrópicos con los efectos en la regulación hídrica de los ecosistemas.

Este modelo aplicado desde el ENA 2018 (Ideam, 2019) fue seleccionado, puesto que en el balance hídrico prioriza los procesos de escorrentía superficial y subsuperficial de forma distribuida. Aplica los conceptos de límites de Budyko (1974), en los cuales los cambios en los almacenamientos son considerados a partir de la relación entre la disponibilidad de agua y la demanda atmosférica, siendo la precipitación el agua disponible y la evapotranspiración potencial la demanda atmosférica. A diferencia de la primera versión del modelo, cuya implementación fue a resolución temporal mensual, en esta versión se evalúan las diferentes variables del ciclo hidrológico a resolución diaria.

De esta manera, el modelo conceptualiza el intercambio de volúmenes de agua en cada celda, considerando dos tanques de almacenamiento: uno que representa una zona de raíces y otro que representa el almacenamiento de agua subterránea, como se indica en la Figura 23.

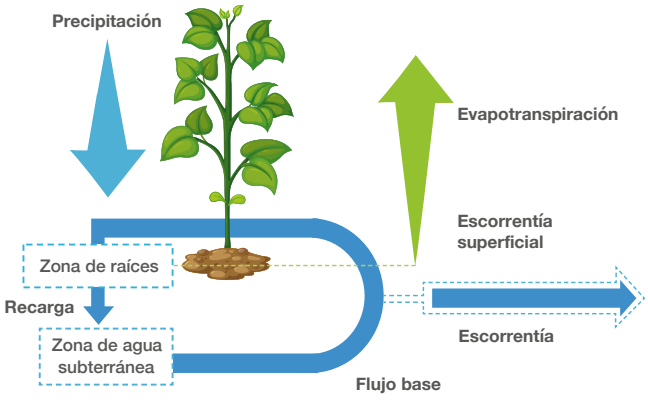



Figura 23. Esquematización del modelo hidrológico Dynamic Water Balance DWB. Fuente: adaptado de Zhang et al., 2008.

Los flujos de agua son descritos por cuatro parámetros, los cuales fueron clasificados a partir del mapa de Coberturas de la Tierra (Ideam, Sinchi y PNN, 2021) y el Modelo Digital de Terreno (NASA, 2013) en 11 unidades de respuesta grupal (Grouped Response Unit, GRU). Así, el modelo se ejecuta en un entorno de programación libre y los parámetros asignados en cada GRU son calibrados y validados a partir de las series diarias de caudal de la red de monitoreo.

Los resultados del modelo son mapas diarios de escorrentía superficial para el periodo 1982-2021, los cuales permiten evaluar la variabilidad climática natural del país en diferentes escalas temporales y espaciales. Inicialmente, se presenta la variación anual de la OHTS para las cinco áreas hidrográficas del país (Figura 24), en la cual se identifican periodos húmedos que se presentaron en el territorio, como en 1999-2000 y 2010-2011, que afectaron más que todo las áreas Caribe, Magdalena - Cauca y Orinoco. Por otro lado, el Pacífico tuvo picos de humedad en los años 1984 y 2008, los cuales afectaron en menor medida el resto del país.

Se observa que el área hidrográfica con mayor variabilidad en excesos es la de Magdalena - Cauca, alcanzando anomalías hasta un 50 % (año 2011) más grandes que la mediana; la siguen el Caribe y el Pacífico con excesos del 29 % y 21 %, respectivamente. En cuanto a la variabilidad en condiciones bajas, los cambios en las cinco áreas hidrográficas oscilan entre un -16 % y -21 %.

Como muestra del alcance de los resultados de la OHTS histórica, se presentan también gráficas acumuladas por mes y por zona hidrográfica; se establecen las condiciones históricas del periodo 1982-2020 a partir de los percentiles 10, 25, 75 y 90, definiendo los rangos históricos característicos de condiciones altas, medias y bajas; y se compara con los valores de los años 2020, 2021 y con el promedio histórico. Los análisis en el presente documento se centran en el año 2021, por ser el más reciente. Para descripciones más específicas del comportamiento hidrológico del año 2020 pueden referirse al Informe del Estado del Ambiente y los Recursos Naturales Renovables (IEARNR) de 2021.

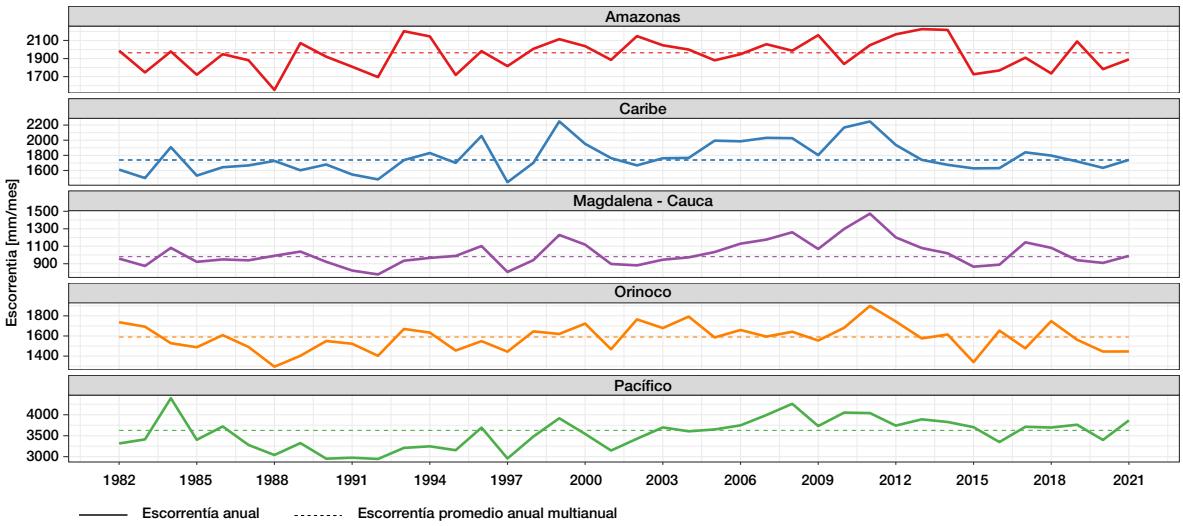



Figura 24. Escorrentías medias anuales por área hidrográfica para el periodo 1982-2021, resultantes del modelo DWB.

## Área hidrográfica Amazonas

La Amazonía colombiana está subdividida en nueve zonas hidrográficas. Cuatro de ellas configuran la región más llana con las cuencas de los ríos Guainía, Vaupés, Apaporis y Yari; estas presentan un régimen hidrológico monomodal, con el pico de humedad en los meses de junio a agosto, como lo indican las gráficas de la Figura 25. En las cuencas del piedemonte amazónico, como las de los ríos Caguán, Caquetá y Putumayo, este pico se presenta en el periodo de mayo a junio. Además, dentro del territorio nacional se encuentra una parte de las cuencas del río Napo y las áreas que drenan directamente sobre el río Amazonas, las cuales constan de áreas inferiores a los 3500 km², por lo que su caracterización puede no ser representativa con respecto al cauce principal; en consecuencia, no se presentan en esta versión del ENA.

El año 2021 en particular, año de referencia para este estudio, en las cuencas de la Amazonía se presentó un comportamiento cercano al normal (definido por un rango entre los percentiles 25 y 75) hasta el mes de septiembre, en donde se observaron unos descensos con respecto a la mediana, alcanzando en general valores cercanos al percentil 10. Este comportamiento fue homogéneo, con excepción de la cuenca del río Guainía, el cual mostró altos volúmenes de agua durante el primer trimestre del año, alcanzó los promedios históricos en el mes de abril y el resto del año presentó reducciones con respecto a la mediana.

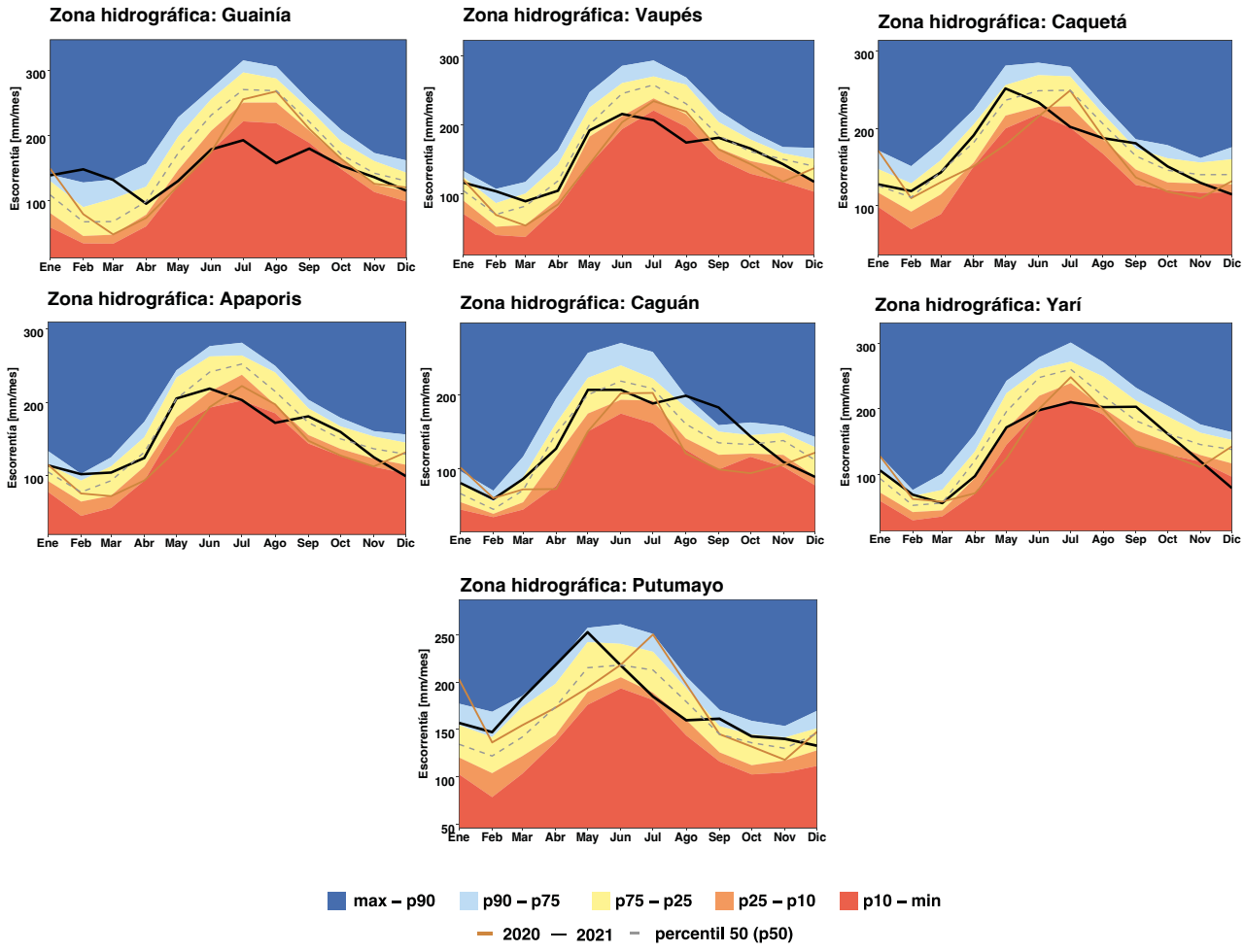



Figura 25. Gráficas de variabilidad de la escorrentía mensual en las zonas hidrográficas del área Amazonas.

## Área hidrográfica Caribe

Además de las islas de San Andrés, Providencia, Roncador y Quitasueño, el área hidrográfica Caribe consta de cinco zonas hidrográficas; destaca la diferencia entre el comportamiento hidrológico de La Guajira y el Catatumbo con respecto al resto de la región, que drena directamente al mar Caribe. Las primeras presentan un régimen bimodal, con dos temporadas húmedas en los meses de mayo a junio y octubre a noviembre, mientras que las cuencas del río Atrato y el río Sinú, que cuentan con grandes llanuras inundables como zonas de amortiguamiento hídrico, muestran una única temporada húmeda al año de más extensión, que va de mayo a diciembre de forma continua, como se presenta en la Figura 26.

Las gráficas también muestran la variación inter-anual del año de referencia para este estudio, en donde se observan los efectos del fenómeno de La Niña durante el 2021 y la presencia de vientos alisios fortalecidos en la cuenca central del Pacífico durante el primer semestre del año, alcanzando valores superiores al percentil 90 en los meses de marzo a abril en el Atrato, Sinú y el Caribe litoral, y presentando valores cercanos al rango normal el resto del año. Por otro lado, en La Guajira y el Catatumbo se observan valores de escorrentía cercanos a la mediana a lo largo del periodo de enero a septiembre, meses en donde se identifican descensos en los volúmenes de agua presentados, cercanos al umbral del percentil 10, mas no de los mínimos históricos.

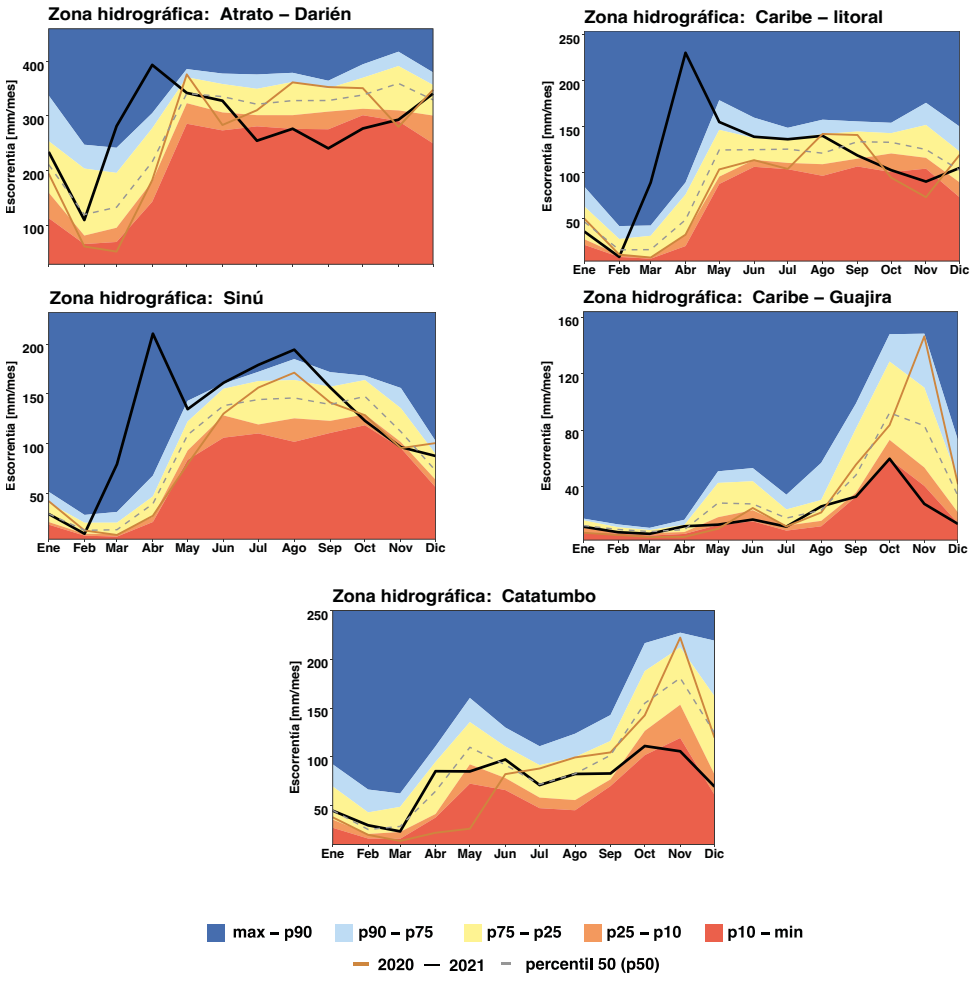



Figura 26. Gráficas de variabilidad de la escorrentía mensual en las zonas hidrográficas del área Caribe.

## Área hidrográfica Magdalena - Cauca

La gran cuenca de los ríos Cauca y Magdalena no cuenta con un único régimen hidrológico, ya que su sistema orográfico es diverso; además, de ser uno de los más intervenidos y regulados por estructuras hidráulicas de captación y almacenamiento. Esta cuenca se encuentra clasificada en nueve zonas hidrográficas que separan los ríos Saldaña, Sogamoso, Cauca, Nechí y Cesar, así como la cuenca alta, media y baja del Magdalena, donde se destacan los complejos cenagosos que actúan como reguladores hídricos.

Las gráficas de la Figura 27 permiten identificar dos regímenes hidrológicos principales: uno bimodal, en las cuencas de la cuenca alta y media del área hidrográfica y una tendencia monomodal en la cuenca baja del Magdalena que incluye los ríos Nechí y Cesar.

La escorrentía del año 2021 fue mayor que la mediana durante todos los meses en el Alto Magdalena; y en las cuencas del Cauca, Saldaña, Medio Magdalena y Sogamoso se mantuvo dentro de los rangos normales de variación intraanual. En contraste, en la parte norte de la cuenca (ríos Nechí, Cesar y Bajo Magdalena), el último trimestre del año presentó bajos volúmenes de escorrentía, caracterizados entre los percentiles 10 y 25.

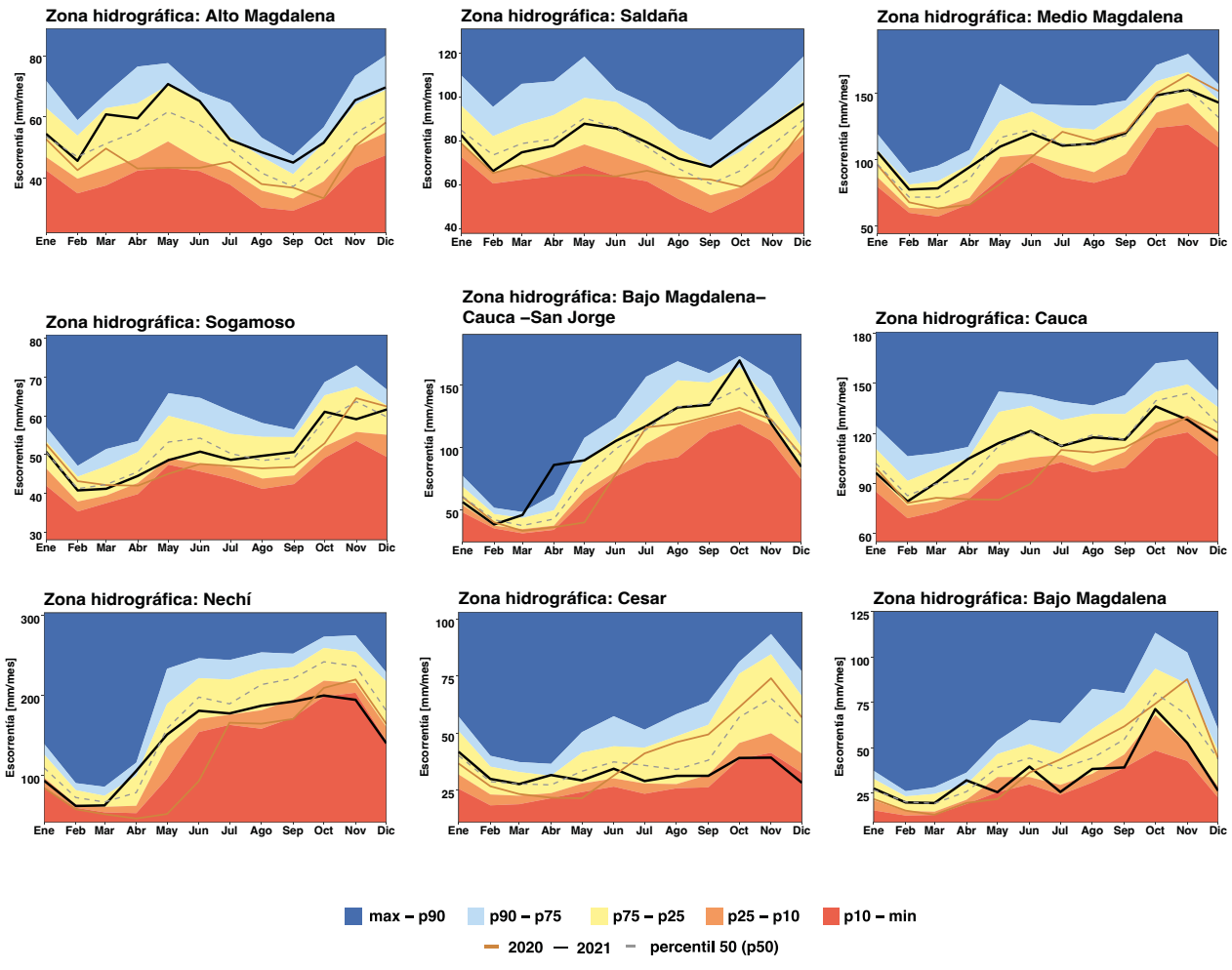



Figura 27. Gráficas de variabilidad de la escorrentía mensual en las zonas hidrográficas del área Magdalena - Cauca.

## Área hidrográfica Orinoco

La Orinoquía consta de nueve zonas hidrográficas, en donde resaltan las cuencas de grandes ríos como el Inírida, el Guaviare, el Vichada, el Tomo, el Meta, el Casanare y el Arauca. Estas cuencas presentan un régimen hidrológico monomodal, con un pico húmedo en los meses de junio a agosto y una temporada seca en el periodo de enero a abril. Además, hay una pequeña parte de la cuenca binacional del río Apure que drena hacia Venezuela, la cual no es considerada en esta versión del Estudio. Las cinco zonas restantes corresponden a áreas que drenan directamente al río Orinoco en la frontera con Venezuela, las cuales, para efectos de los análisis de variabilidad hidrológica, son agrupadas en una única gráfica de las presentadas en la Figura 28, evidenciando características similares de variabilidad intraanual.

Con respecto al año de referencia (2021), las cuencas del Orinoco presentaron escorrentías más altas que los promedios históricos (entre el rango de los percentiles 75 y 90) durante la temporada normalmente seca; en contraste, durante el pico húmedo, los volúmenes de agua en estas cuencas estuvieron cercanos al rango inferior considerado normal, es decir, al percentil 25. Por otro lado, la cuenca del río Arauca tuvo todo el semestre, de mayo a noviembre, valores por debajo del percentil 10, indicando valores bajos durante la temporada más húmeda del año.

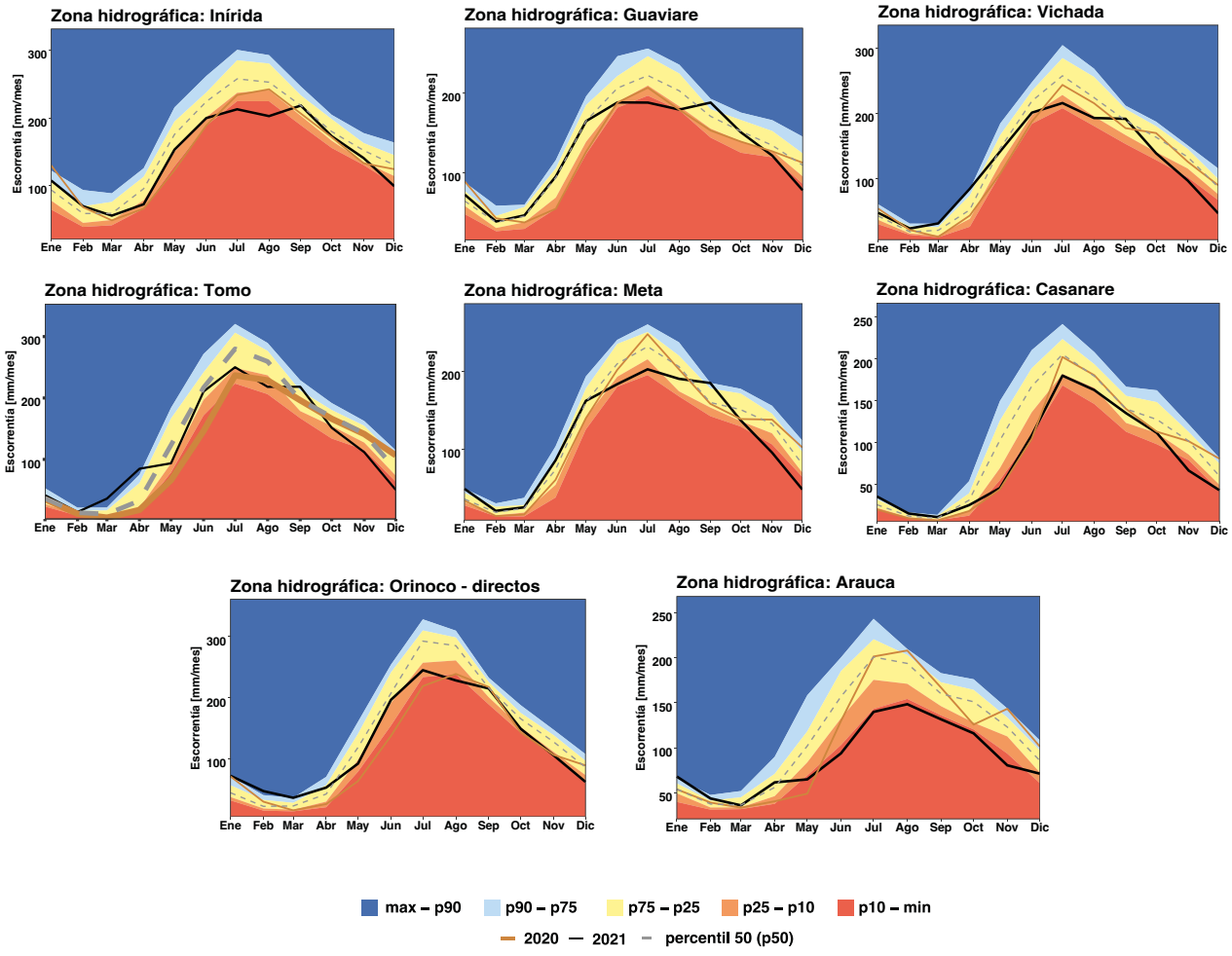



Figura 28. Gráficas de variabilidad de la escorrentía mensual en las zonas hidrográficas del área Orinoco.

## Área hidrográfica Pacífico

Las cuencas de esta área se agrupan en seis zonas hidrográficas que incluyen los ríos principales que drenan directamente al océano Pacífico (Figura 29). El régimen hidrológico de estas cuencas se puede diferenciar en dos zonas: la región de los ríos Mira y Patía, y la del río San Juan y los otros directos al Pacífico. La primera región presenta un comportamiento monomodal con el periodo húmedo entre abril y junio, y un periodo de estiaje de agosto a octubre. Durante 2021, esta región presentó en el primer trimestre del año valores de oferta hídrica superiores al percentil 90, influenciado por los efectos del fenómeno de La Niña.

Por otro lado, las cuencas de los ríos Tapaje, Dagua y San Juan presentan dos temporadas húmedas entre los meses de mayo a junio y octubre a enero. Durante el año de referencia del estudio, las cuencas del Tapaje y el Dagua tuvieron condiciones más húmedas que los promedios históricos, siendo particularmente altas en los meses de enero, junio y septiembre, meses en los que se superó el percentil 90. En cuanto al río San Juan, en el 2011 se observaron condiciones cercanas a las normales durante el primer semestre del año, las cuales decrecieron en el segundo semestre con valores cercanos al percentil 10 de los valores históricos simulados.

En contraste, la región del Baudó y el norte del Pacífico, limítrofe con la cuenca del río Atrato, presenta una menor variabilidad intraanual con un periodo de estiaje entre enero y abril, conservando valores altos el resto del año. Estas cuencas presentaron valores cercanos al rango normal, salvo en los meses de marzo y abril, cuando se evidenciaron condiciones más húmedas, alcanzando volúmenes de oferta hídrica superiores al percentil 90; y los meses de julio a septiembre en donde se observa una reducción con respecto a los volúmenes antecedentes y a los promedios históricos.

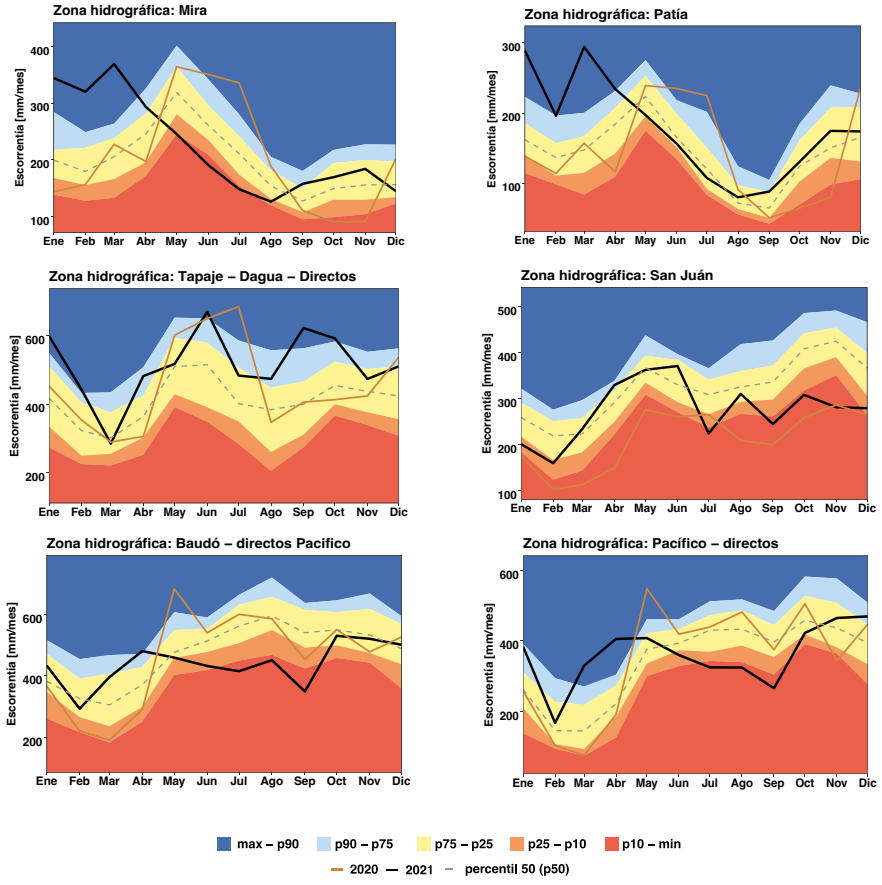



Figura 29. Gráficas de variabilidad de la escorrentía mensual en las zonas hidrográficas del área Pacífico.

Los análisis presentados son una extracción de los mapas resultantes de la aplicación del modelo DWB y demuestran su utilidad en el seguimiento de las condiciones hidrológicas del país. Además, indican la alta sensibilidad a la variabilidad hidroclimática en las diferentes cuencas colombianas, las cuales presentan condiciones heterogéneas en sus regímenes hidrológicos, así como en la afectación por fenómenos macroclimáticos. Del mismo modo, se observa una mayor variabilidad natural en las áreas Magdalena - Cauca, el Caribe y el Pacífico; sin embargo, debido a condiciones orográficas y climáticas locales estas condiciones pueden variar.

En general, durante 2021, se presentaron valores de escorrentía cercanos y superiores al percentil 75 durante el primer semestre del año en las áreas Caribe, Magdalena-Cauca y Pacífico, es decir, valores en un rango por encima de lo normal, influenciados por la presencia del fenómeno de La Niña durante el año 2021 y la presencia de vientos alisios fortalecidos en la cuenca central del Pacífico durante este periodo.

Finalmente, para todos los análisis de oferta hídrica superficial presentados, se espera continuar mejorando en el futuro los insumos meteorológicos e hidrológicos; aumentar la cobertura de la red de medición y explorar bases de datos construidas a partir de satélites o radares para la reducción de incertidumbre en regiones no instrumentadas.

## 3.2 Análisis de los eventos de sequía en Colombia

Las condiciones de sequía en el territorio —en función de su duración, extensión y magnitud— generan impactos sobre la población, incluso grandes pérdidas económicas, de tal forma que se presentan afectaciones importantes en el bienestar de la sociedad y en las poblaciones asentadas en los territorios en donde surgen estos fenómenos.

De acuerdo con la OMM (Organización Meteorológica Mundial), los eventos de sequía son desastres de gran impacto en la sociedad que generaron entre 1970 y 2019 un total aproximado de 650.000 muertes en el mundo. Así mismo, se estima que 55 millones de personas en el planeta son afectadas directamente por estos eventos cada año (Drought in Numbers 2022 - United Nations, s. f.). En Colombia, los eventos más relevantes de sequía se encuentran asociados con eventos de variabilidad climática, acentuados por cuenta de los fenómenos de El Niño; durante los años 1997-1998, por que generó pérdidas económicas en el sector agrícola por cerca de 101 millones de dólares (Departamento de Geografía, Facultad de Humanidades, Universidad del Valle et al., 2020).

El estudio y análisis de los eventos de sequía con un enfoque integral sobre el recurso hídrico tiene como objetivo obtener una visión consolidada sobre los efectos que generan los periodos de déficit de precipitación sobre las variables de humedad del suelo y escorrentía del ciclo hidrológico. Para ello, se integran las variables que describen el ciclo hidrológico a partir de resultados de los ejercicios de modelación y de insumos de campos de precipitación, obtenidos de imágenes satelitales y estaciones en tierra; de tal forma, se obtienen índices que caracterizan los eventos de sequía en diferentes agregaciones espaciales y temporales.

La espacialización de los resultados obtenidos para cada índice y cada agregación temporal permite entender el proceso de evolución espaciotemporal de los eventos de sequía sobre cada una de las variables que describen el ciclo hidrológico y su correspondiente relación desde el análisis multivariado.

En el presente capítulo, inicialmente se condensa el enfoque metodológico y conceptual sobre los conceptos principales del estudio de los eventos de sequía, y la construcción y cálculo de los índices multivariados. Luego, con los resultados obtenidos para diferentes periodos de agregación, se incluye un análisis de los eventos que son evidenciados con la metodología utilizada y para diferentes unidades espaciales de análisis (zonas hidrográficas, subzonas, departamentos y municipios). De esta manera, se plantea una visión en términos de alcance espacial de los eventos más críticos en el territorio, espacializando los índices obtenidos. Por último, a partir de estos índices y de los elementos que permiten caracterizar los eventos de sequías, se calcula un

índice multivariado para cada periodo de agregación, el cual es incorporado dentro de los análisis integrados en este estudio ENA 2022.

### 3.2.1 Antecedentes

Por definición, los eventos de sequía se conocen como periodos de tiempo en los cuales se presenta una disminución del volumen de precipitaciones con respecto a lo normal para una región en particular; de acuerdo con lo anterior, el evento que se considere puede tener una duración —definida como el periodo de tiempo en el cual se mantiene las condiciones de déficit— y una magnitud que propende hacia una comparación de la condición del evento identificado con las condiciones consideradas normales.

A partir del seguimiento y la caracterización espaciotemporal de algunas variables que describen el ciclo hidrológico es posible describir y definir el comportamiento de los eventos de sequía en un territorio en particular; de tal forma, existen múltiples aproximaciones a partir del uso de índices que involucran diferentes variables.

Dentro de los más conocidos y usados por su sencillez y facilidad de cálculo se encuentra el *índice de precipitación estándar* (SPI, por sus siglas en inglés) que permite caracterizar los eventos de sequía en función de su intensidad, extensión y duración; para ello, se usan las series históricas de precipitación y se efectúa una normalización de estas, a fin de establecer las anomalías en los volúmenes de precipitación en cada punto en estudio y para diferentes periodos de agregación en función de la desviación estándar de la serie en análisis (McKee et al., s. f.). La metodología fue propuesta por el profesor Thomas McKee y John Kleist en 1993, y hoy es usada ampliamente en el mundo como insumo para diferentes tipos de monitores de sequía.

Sin embargo, su simplicidad no refleja el comportamiento complejo de los eventos de sequía y sus impactos en el ciclo hidrológico y sus componentes; en la medida en que el evento se extiende en el tiempo, su impacto y posible afectación sobre las variables que hacen parte del flujo del agua en el ciclo hidrológico, en el subsuelo y en las corrientes hídricas puede ser de mayor o menor magnitud y a su vez su extensión, dependiendo de la duración y de la intensidad del evento. Es necesario entonces hacer un análisis sobre las variables de precipitación, escorrentía y humedad del suelo con una visión integral, de manera conjunta (Dracup et al., 1980).

Es así como se utilizan índices compuestos o multivariados que incorporen las variables de humedad del suelo y escorrentía, introduciendo en el índice propuesto el seguimiento de forma integral sobre el ciclo hidrológico; con ello, se obtiene una visión hidrológica de los impactos, en términos de intensidad y extensión en términos de área, de los eventos de sequía sobre el territorio nacional. Lo anterior, de acuerdo con la definición establecida de sequía como una manifestación extrema de la variabilidad del ciclo hidrológico (Rangel et al., 2017).

### 3.2.2 Enfoque conceptual y metodológico

Si bien es cierto la precipitación define las condiciones de sequía, su impacto sobre los componentes del ciclo hidrológico es una función de la duración y de las condiciones propias de cada sitio y evento en análisis (Dracup et al., 1980). Es decir, de acuerdo con la magnitud y duración del evento de sequía, las variables del ciclo hidrológico como la humedad del suelo y la escorrentía a su vez presentan comportamientos que son alterados como consecuencia de los eventos de sequía.

La duración de los eventos y su extensión geográfica definen su implicación e incidencia sobre los diferentes componentes del ciclo hidrológico. A medida que el evento se extiende en el tiempo, las afectaciones se propagan sobre diferentes elementos denotando diferentes tipos de sequía; la sequía meteorológica es generada como consecuencia de la disminución de los volúmenes de precipitación y es la evidencia inicial del evento de sequía; posteriormente, y dependiendo de la duración, se observan afectaciones sobre la humedad del suelo, lo cual denota una implicación de tipo agrológico; en el caso de mayor duración del evento, su influencia es evidente en los caudales de los ríos y en las aguas subterráneas, lo que refiere a una sequía hidrológica.

El ENA 2022 incorpora el análisis multivariado de las variables principales del ciclo hidrológico (precipitación, humedad del suelo y escorrentía) con el fin de implementar métricas estadísticas que permiten caracterizar los eventos de sequía en el territorio nacional; se hace uso del déficit de precipitación y —de forma adicional, desde un punto de vista integral— de variables adicionales que hacen parte del ciclo hidrológico, en este caso, humedad del suelo y escorrentía.

El procedimiento metodológico se indica de manera resumida en la Figura 30, donde se relatan los pasos principales que son surtidos de manera secuencial para la obtención final de los índices en cada periodo de agregación.

La generación de los índices se efectúa a partir de información tipo ráster, con resoluciones espaciales de 5 kilómetros para Colombia y temporales a nivel mensual para los años de 1983 a 2020 en las variables de precipitación, humedad del suelo y escorrentía. Se obtuvieron tres índices univariados correspondientes a cada variable; índices bivariados de precipitación y humedad del suelo, y de precipitación y escorrentía; índices multivariados de precipitación-escorrentía-humedad del suelo y precipitación-humedad del suelo-escorrentía; el procedimiento descrito se realiza para agregaciones temporales de 1, 3, 6, 9, 12, 18 y 24 meses.

De esta forma, los índices univariados permiten avanzar en análisis del déficit de humedad en función de una sola variable (déficit de lluvia, caudal, etc.). De forma análoga, los índices multivariados incluyen varios elementos que hacen parte del ciclo hidrológico en la caracterización de la sequía (combinación de indicadores meteorológicos como precipitación y evapotranspiración) (Rangel et al., 2017).

Las agregaciones temporales permiten hacer énfasis en cada uno de los tipos de sequía de acuerdo con su propagación sobre cada uno de los componentes del ciclo hidrológico. En este sentido, la primera afectación se evidencia sobre la precipitación en escalas de cortos periodos de tiempo (1-9 meses), luego sobre la humedad del suelo (9-18 meses) y, por último, sobre la escorrentía superficial (18-24 meses). Eventualmente, la incorporación de una variable adicional que describa el comportamiento del agua subterránea podría ser tenida en cuenta como complemento para esta metodología.

A fin de consolidar toda la información generada, se utilizan los cálculos realizados en diferentes agregaciones temporales (1, 3, 6, 9, 12, 18 y 24 meses), también para índices univariados de precipitación, humedad del suelo y escorrentía y para índices multivariados que incluyen las tres variables univariadas.

Con la información generada, se elaboran análisis de los diferentes eventos ocurridos en el país. Para el ENA 2022 se usan los índices multivariados de acuerdo con la metodología enunciada antes; se usan como insumo capas grilladas con resolución espacial de 5 kilómetros y a niveles de agregación mensual, para un total cercano a 37.319 celdas en el territorio continental del país para las variables de entrada de precipitación obtenida como insumo de CHIRPS (por su sigla en inglés, Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data)

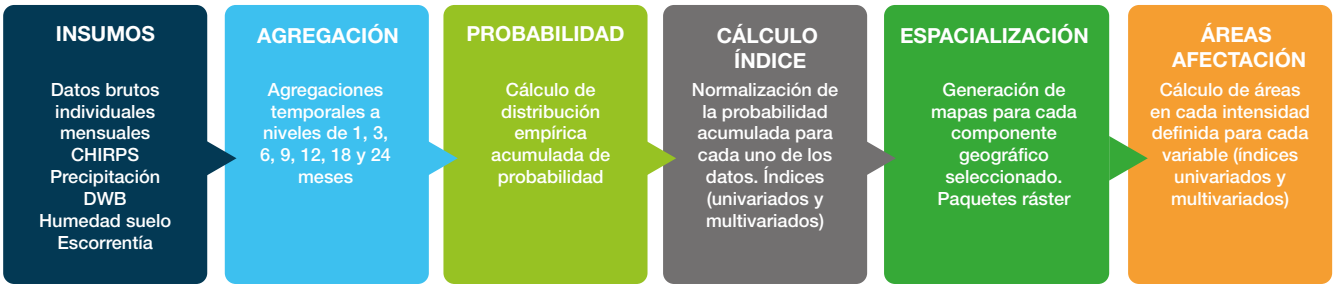



Figura 30. Metodología para generación de índices de sequía.

(Funk et al., 2015); y para humedad del suelo y escorrentía como salida del modelo hidrológico Dynamic Water Balance (DWB) (Zhang et al., 2008), usado dentro del presente estudio.

Las capas anteriores son agregadas a partir de sumas acumulativas de acuerdo con los periodos de análisis de 1, 3, 6, 9 12, 18 y 24 meses para cada variable de entrada. A partir de cada periodo de tiempo, se obtienen series de tiempo para cada una de las celdas, cada periodo de acumulación y, en cada una de ellas, se hace el cálculo correspondiente para cada índice univariado; posteriormente, se efectúan los respectivos cálculos para obtener los índices multivariados de acuerdo con los siguientes conceptos:

El *índice estandarizado de precipitación* (IEP, o también SPI, por sus siglas en inglés) es calculado a partir de una función de distribución de frecuencia de probabilidad acumulada empírica de los datos de precipitación y luego normalizada a una función de distribución normal estándar (McKee et al., s. f.).

$$SPI = \theta^{-1}(p)$$

Donde $\theta$ es la función de distribución normal estándar y $p$ es la probabilidad empírica. Con el uso de la metodología de cálculo del SPI se pueden obtener los índices estandarizados para otras variables hidrológicas como escorrentía y humedad del suelo.

En el desarrollo del ejercicio, los diferentes índices fueron calculados para las variables de precipitación, humedad del suelo y escorrentía mensual para el periodo de enero 1983 - diciembre 2020; los agregados calculados son de 1 mes y de 3, 6, 9, 12, 18 y 24 meses.

*El índice estandarizado multivariado de sequía* (IEMS, o también MSDI, por sus siglas en inglés) combina la información obtenida de dos o más variables relacionadas con la sequía, usando la función de distribución conjunta de ambas variables.

La probabilidad conjunta acumulada $p$ obtenida también a partir de una función empírica, se normaliza a una función de distribución normal estándar para obtener el MSDI:

$$MSDI = \theta^{-1}(p)$$

Al combinar tres variables en el cálculo del IEMS, se utilizan dos variables aleatorias; la primera variable es el IEMS calculado con las dos primeras variables (precipitación y humedad del suelo o escorrentía) estandarizadas de acuerdo con la definición del IEP; y se incluye una tercera variable aleatoria que corresponde al índice estandarizado de la tercera variable.

La espacialización de los resultados obtenidos para cada índice y cada agregación temporal permite entender el proceso de evolución espaciotemporal de los eventos de sequía sobre cada una de las variables y su correspondiente relación desde el análisis multivariado.

**Magnitud.** Describe el grado de severidad del evento en función de una métrica establecida; para este caso, cada uno de los índices usados. La caracterización de los eventos de sequía requiere clasificar su magnitud acumulada entendida como la sumatoria de los valores del índice utilizado durante el periodo de duración del evento a partir de un valor de umbral que sea definido.

$$MS = \sum_{j=1}^{x} INDICE_{ij}$$

En donde se inicia el cálculo en el mes de inicio del evento *j* y se continua hasta el fin del evento *x*, para los periodos de tiempo *i* que sean definidos. Es decir, la sumatoria del índice en el periodo de tiempo en donde se supera un valor de umbral definido; en este caso, el valor mínimo es -0,5.

De tal forma que, al elaborar los cálculos a nivel de cada uno de los pixeles donde se cuenta con información (37.319), es posible entender el proceso de evolución y extensión del evento de acuerdo con cada uno de los índices y agregaciones temporales definidas.

**Clasificación de eventos.** Con el propósito de comprender y caracterizar la intensidad de los eventos y su respectiva clasificación, se utilizan los rangos establecidos por el monitor de sequías de Estados Unidos y, de manera homóloga, por el IMTA (Instituto Mexicano de Tecnologías del Agua),

el cual establece cuatro diferentes graduaciones en las magnitudes de la sequía desde los indicadores: *D1*, que indica áreas con sequías moderadas, hasta *D4*, donde se identifican áreas con sequías excepcionales; también es incluida una clasificación *D0*, que indica zonas anormalmente secas, condición que puede ser precedente a la ocurrencia de un evento de sequía (Svoboda et al., s. f.). Lo anterior está condensado en la Tabla 13.

Tabla 13. Categorías de intensidad de sequía, monitor norteamericano de sequías.

| Clave | Rango | Categoría |
|---|---|---|
| W4 | >2 | Excepcionalmente húmedo |
| W3 | 1.6-2 | Extremadamente húmedo |
| W2 | 1.3-1.6 | Severamente húmedo |
| W1 | 0.8-1.3 | Moderadamente húmedo |
| W0 | 0.5-0.8 | Anormalmente húmedo |
| Normal | 0.5 a -0.5 | Normal |
| D0 | -0.5 a -0.8 | Anormalmente seco |
| D1 | -0.8 a -1.3 | Sequía moderada |
| D2 | -1.3 a -1.6 | Sequía severa |
| D3 | -1.6 a -2 | Sequía extrema |
| D4 | < -2.0 | Sequía excepcional |

Una vez efectuados los cálculos correspondientes para cada una de las series univariadas, se obtienen los resultados en cada una de las agregaciones espaciales definidas usando la mediana del total de las celdas ubicadas al interior de cada unidad geográfica de análisis. Lo anterior permite tener una referencia del comportamiento de cada variable desde cada índice para el país; y a partir de esta información, en los niveles de resolución espacial en los niveles municipales y en su agregación departamental; y de la misma forma, a niveles de subzonas hidrográficas y su respectiva agregación a niveles de zonas hidrográficas.

Por último, se consolida un índice que da cuenta del comportamiento de las sequías a nivel de cada una de las agregaciones espaciales. Se realiza el cálculo de la magnitud de cada evento, calculado como la suma de los valores del índice en análisis en el periodo de duración del evento, y el cálculo del periodo de duración de cada evento; es decir, el número de meses en total que el valor del índice analizado se encuentra con un valor menor a -0.5 (correspondiente a un periodo anormalmente seco, acorde con la categoría de intensidad de sequía mostrada en la Tabla 13).

La relación obtenida entre la sumatoria de las magnitudes de los eventos identificados y la sumatoria de sus duraciones corresponde al índice de sequía para Colombia, el cual se calcula para cada uno de los índices univariados teniendo en cuenta las agregaciones.

### 3.2.3 Análisis de índices multivariados de sequía para Colombia

Para este análisis se identifican y caracterizan los eventos de sequía en diferentes agregaciones espaciales y temporales a nivel nacional, por zonas hidrográficas y por departamentos.

#### 3.2.3.1 Análisis de eventos de sequía a nivel nacional

Se realizaron análisis sobre cada uno de los índices calculados centrándose en los tres univariados y los índices multivariados que incluyen las tres variables: en total, tres índices univariados y dos índices multivariados, con lo cual —incluyendo las agregaciones temporales (1, 3, 6, 9, 12, 18 y 24 meses), y analizando el promedio de cada índice a nivel departamental— se identifican en total 579 eventos en el territorio nacional; lo anterior, a partir del valor correspondiente al índice en análisis, considerando el inicio del evento a partir del mes en el cual el valor del índice llega a -0.5 y su duración va hasta el mes que el índice supere el valor de umbral indicado. El resumen de los eventos identificados para los índices univariados (precipitación, humedad del suelo y escorrentía) y el índice multivariado que incluye las tres variables (precipitación, humedad del suelo y escorrentía) para cada periodo de agregación se incluye en la Tabla 14.

Tabla 14. Eventos de sequía identificados a nivel nacional.

| Indicador | 1 mes | 3 meses | 6 meses | 9 meses | 12 meses | 18 meses | 24 meses |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Precipitación | 36 | 37 | 31 | 27 | 11 | 22 | 9 |
| Escorrentía | 31 | 32 | 25 | 12 | 4 | 12 | 2 |
| Humedad del suelo | 32 | 32 | 23 | 14 | 6 | 15 | 4 |
| Precipitación-humedad-escorrentía | 36 | 36 | 33 | 23 | 8 | 21 | 5 |

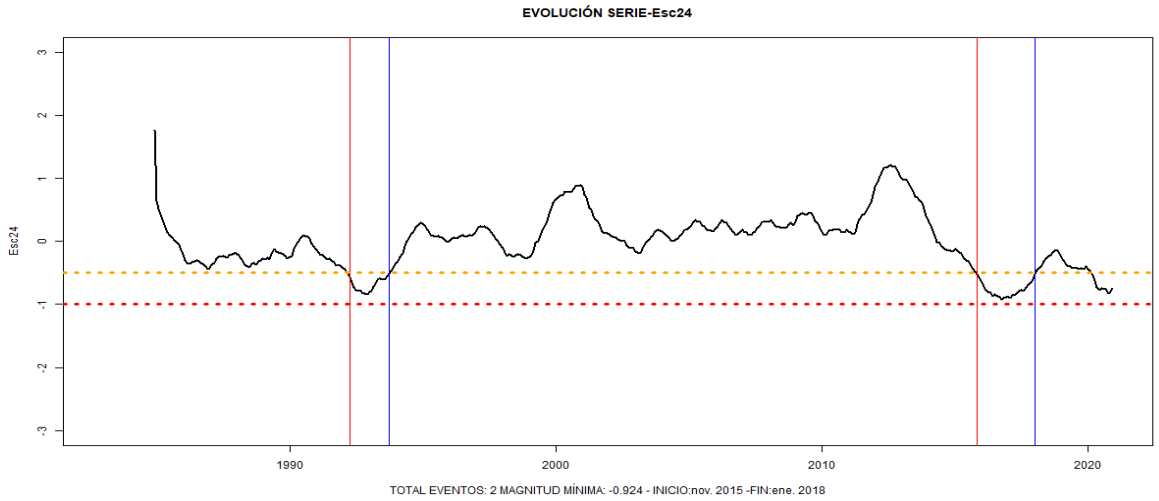



Figura 31. Identificación eventos sequía en orden nacional, índice escorrentía agregación 24 meses.

En la Figura 31, se grafica el comportamiento temporal del índice univariado de escorrentía con agregación de 24 meses; del análisis se identifican dos eventos: las líneas rojas continuas indican el inicio y las líneas azules el final de cada evento; de acuerdo con los umbrales establecidos, de esta forma es posible calcular: la duración y la magnitud de cada evento, durante toda la ventana temporal de análisis, para cada agregación temporal y cada índice en análisis.

De tal forma, a manera de consolidado, la gráfica siguiente evidencia la forma como cada índice identifica la ocurrencia de eventos en el tiempo, de acuerdo con cada periodo de agregación; se resalta que, a medida que los periodos de agregación aumentan, los eventos identificados tienen mayor duración y son menos frecuentes.

A su vez, la Tabla 15 incluye la identificación de eventos en el territorio nacional en el periodo de análisis de 1983 a 2020, identificando el número de meses en promedio de duración de los eventos, el valor mínimo del índice en cada periodo de agregación, la magnitud acumulada en promedio y el número de eventos para cada agregación e índice. La variabilidad de la precipitación permite identificar, en agregación mensual, 36 eventos diferentes, con una duración promedio cercana a tres meses y una magnitud acumulada cercana a -4.44, con un valor del índice mensual estandarizado más bajo de -2.06, que lo ubica en una clasificación D4, lo que establece una intensidad de sequía excepcional, de acuerdo con la Tabla 13.

Tabla 15. Resumen eventos identificados a nivel nacional, periodo 1983 - 2020.

| Indicador | Prom. duración | Mag. mínima | Prom. mag. | Eventos |
|---|---|---|---|---|
| Precipitación-mensual | 3.03 | -2.06 | -4.44 | 36 |
| Precipitación-3 meses | 3.19 | -2.29 | -4.95 | 37 |
| Precipitación-6 meses | 3.58 | -2.01 | -5.13 | 31 |
| Precipitación-9 meses | 3.78 | -1.75 | -4.83 | 27 |
| Precipitación-12 meses | 6.36 | -1.67 | -9.50 | 11 |
| Precipitación-18 meses | 4.36 | -1.60 | -6.02 | 22 |
| Precipitación-24 meses | 8.00 | -1.03 | -10.17 | 9 |
| Escorrentía-mensual | 3.19 | -1.84 | -4.40 | 31 |
| Escorrentía-3 meses | 3.22 | -1.90 | -4.38 | 32 |
| Escorrentía-6 meses | 3.56 | -1.57 | -4.62 | 25 |
| Escorrentía-9 meses | 5.25 | -1.50 | -7.14 | 12 |
| Escorrentía-12 meses | 10.00 | -1.26 | -15.01 | 4 |
| Escorrentía-18 meses | 5.58 | -1.24 | -7.20 | 12 |
| Escorrentía-24 meses | 23.00 | -0.92 | -32.93 | 2 |
| Humedad del suelo-mensual | 3.41 | -1.98 | -4.95 | 32 |
| Humedad del suelo-3 meses | 3.56 | -2.01 | -5.17 | 32 |
| Humedad del suelo-6 meses | 4.17 | -1.81 | -6.13 | 23 |
| Humedad del suelo-9 meses | 5.36 | -1.65 | -7.77 | 14 |
| Humedad del suelo-12 meses | 11.00 | -1.55 | -16.94 | 6 |
| Humedad del suelo-18 meses | 5.53 | -1.42 | -7.75 | 15 |
| Humedad del suelo-24 meses | 15.50 | -1.12 | -22.54 | 4 |
| Multivariado precipitación-escorrentía-humedad-mensual | 3.78 | -2.11 | -6.43 | 36 |
| Multivariado precipitación-escorrentía-humedad-3 meses | 3.89 | -2.22 | -6.54 | 36 |
| Multivariado precipitación-escorrentía-humedad-6 meses | 4.52 | -1.87 | -7.02 | 33 |
| Multivariado precipitación-escorrentía-humedad-9 meses | 5.74 | -1.86 | -8.76 | 23 |
| Multivariado precipitación-escorrentía-humedad-12 meses | 11.13 | -1.83 | -18.43 | 8 |
| Multivariado precipitación-escorrentía-humedad-18 meses | 5.95 | -1.71 | -8.97 | 21 |
| Multivariado precipitación-escorrentía-humedad-24 meses | 18.80 | -1.35 | -28.99 | 5 |

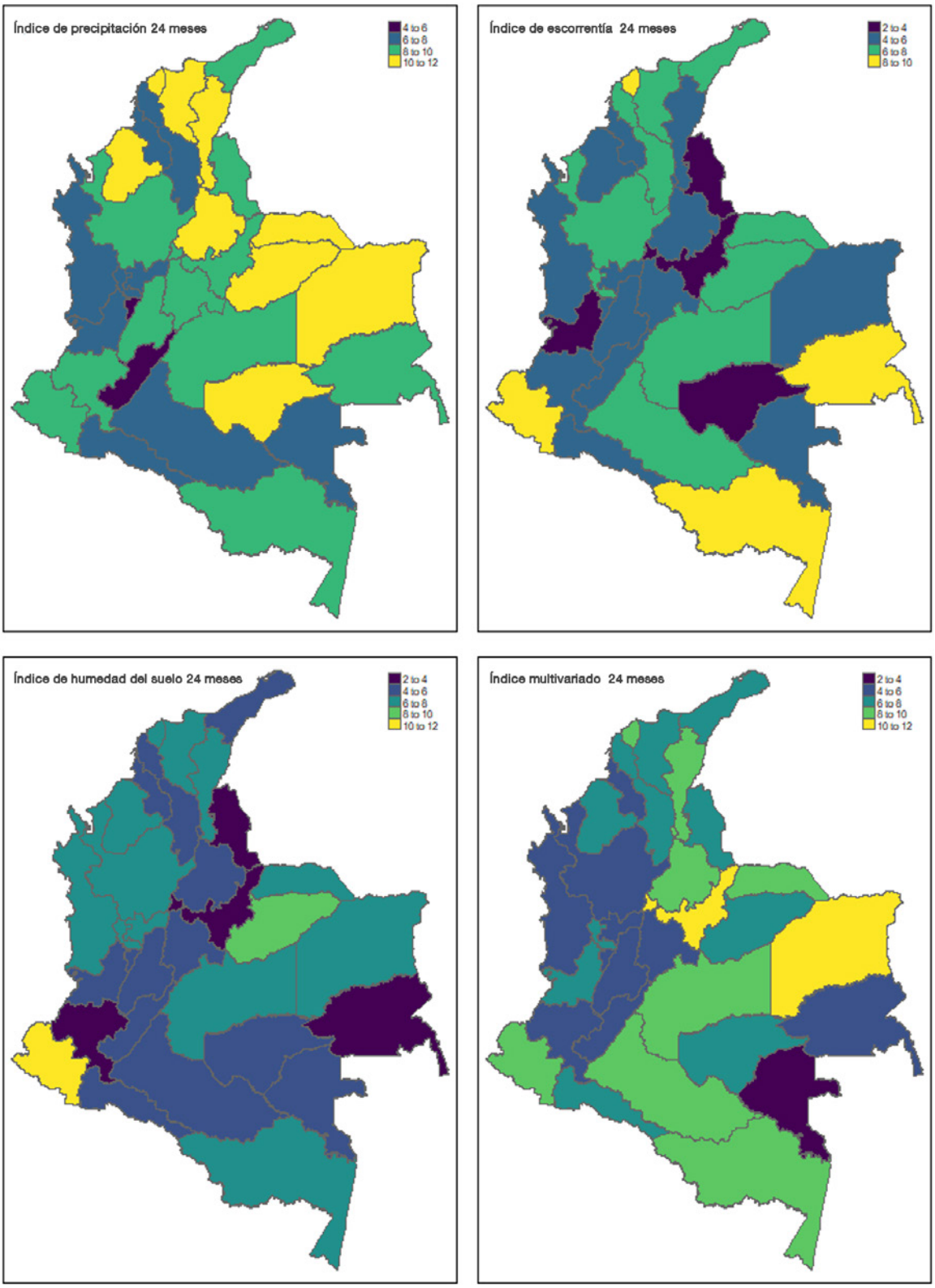



Figura 32. Eventos de sequía identificados con índices univariados e índice multivariado agregado para 24 meses.

Al hacer la identificación de eventos correspondientes a las agregaciones espaciales, en particular a nivel departamental, se puede obtener el número de eventos y su magnitud y duración. La Figura 32 permite comparar el número de eventos a niveles departamentales que se identifican con el uso de índices univariados y del índice multivariado que integra los tres univariados (precipitación, escorrentía y humedad del suelo).

De manera similar, el resumen de los principales eventos identificados con los índices a nivel departamental y diferentes periodos de agregación se encuentra en la Tabla 16. Se incluyen 18.074 eventos identificados en los niveles departamentales con el uso de los diferentes índices y agregaciones temporales. Se observa cómo las duraciones en promedio de los índices univariados son menores que las del multivariado, evidenciando la utilidad de este indicador para caracterizar la duración del evento en análisis en el tiempo, desde la perspectiva de su incidencia en las tres variables en análisis (es decir, precipitación, humedad del suelo y escorrentía).

El desarrollo de los procesos en el territorio puede ser caracterizado con el uso de gráficas que permitan entender la forma como los eventos evolucionan en el tiempo y se extienden de acuerdo con su duración e intensidad; esto es reflejado en gráficas para cada índice y periodo de agregación, analizándolos como una serie temporal, y según su clasificación y extensión espacial en el territorio.

La Figura 33 permite evidenciar el porcentaje en área del territorio nacional en el cual el índice de precipitación para cada periodo de agregación alcanza una determinada clasificación (según Tabla 13). El eje vertical establece el área total del territorio en porcentaje y, en el sentido horizontal, se muestra la línea de tiempo en meses.

En función de la extensión espacial de los eventos, el índice multivariado para una agregación de 24 meses, de acuerdo con la Figura 34, es posible evidenciar que el evento ocurrido durante los años 2015 a 2017 fue aquel que alcanzó una mayor extensión en el territorio nacional, llegando en abril de 2016 a una clasificación D4 en un 22,76 % del país y D3 en el 13,72 %; para octubre de 2016, un 39,52 % del territorio se encontraba en alguna de las dos clasificaciones, es decir, D3 o D4; y en ese mismo mes, cerca del 80 % (de acuerdo con la clasificación del índice multivariado) se encontraba en alguna condición de sequía, es decir, un valor inferior a -0.5 del índice en análisis.

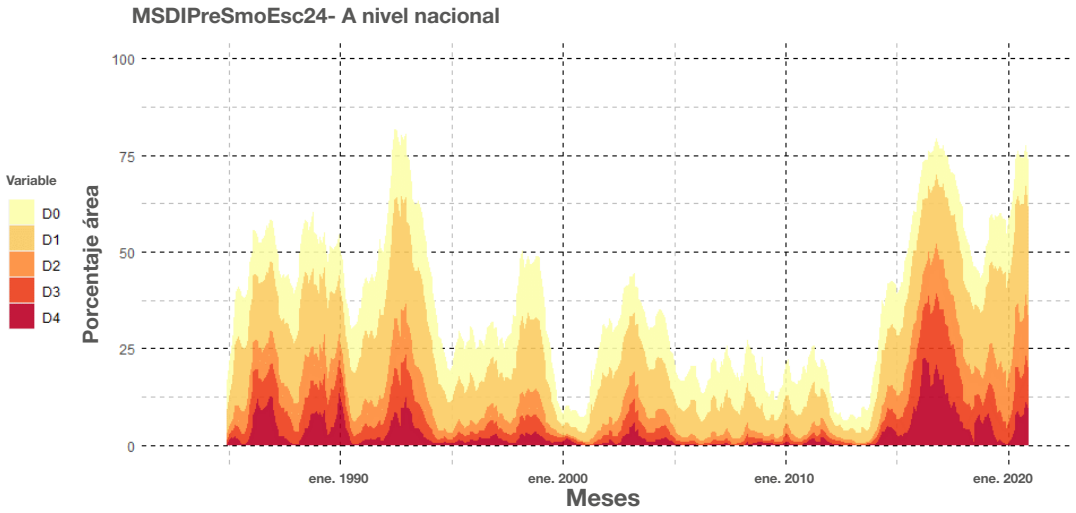



Figura 33. Porcentaje área territorio nacional para cada categoría de intensidad de sequía, periodo 1983-2020, índice estandarizado univariado, precipitación con periodo de agregación de 24 meses.

Tabla 16. Resumen de eventos identificados a nivel departamental, periodo 1983-2020.

| Indicador | Prom. duración | Mag. mínima | Prom. mag. | Eventos |
|---|---|---|---|---|
| Precipitación-mensual | 3.125 | -2.849 | -4.833 | 1155 |
| Precipitación-3 meses | 3.354 | -2.848 | -5.635 | 1182 |
| Precipitación-6 meses | 4.372 | -2.845 | -7.660 | 907 |
| Precipitación-9 meses | 4.324 | -2.843 | -7.466 | 886 |
| Precipitación-12 meses | 9.341 | -2.841 | -17.607 | 372 |
| Precipitación-18 meses | 5.934 | -2.837 | -10.785 | 638 |
| Precipitación-24 meses | 12.338 | -2.832 | -23.183 | 260 |
| Escorrentía-mensual | 3.823 | -2.849 | -6.437 | 957 |
| Escorrentía-3 meses | 4.229 | -2.848 | -7.230 | 904 |
| Escorrentía-6 meses | 5.571 | -2.845 | -9.848 | 678 |
| Escorrentía-9 meses | 6.774 | -2.615 | -12.108 | 526 |
| Escorrentía-12 meses | 13.055 | -2.841 | -24.483 | 254 |
| Escorrentía-18 meses | 8.543 | -2.837 | -15.616 | 407 |
| Escorrentía-24 meses | 18.566 | -2.603 | -34.521 | 166 |
| Humedad del suelo-mensual | 3.694 | -2.621 | -6.023 | 941 |
| Humedad del suelo-3 meses | 4.197 | -2.619 | -7.022 | 882 |
| Humedad del suelo-6 meses | 5.386 | -2.617 | -9.314 | 676 |
| Humedad del suelo-9 meses | 6.711 | -2.615 | -11.712 | 519 |
| Humedad del suelo-12 meses | 13.301 | -2.841 | -24.352 | 246 |
| Humedad del suelo-18 meses | 8.811 | -2.837 | -15.757 | 391 |
| Humedad del suelo-24 meses | 18.399 | -2.603 | -33.768 | 163 |
| Multivariado precipitación-escorrentía-humedad-mensual | 4.279 | -2.849 | -7.923 | 1188 |
| Multivariado precipitación-escorrentía-humedad-3 meses | 4.682 | -2.848 | -8.932 | 1118 |
| Multivariado precipitación-escorrentía-humedad-6 meses | 6.280 | -2.845 | -12.240 | 842 |
| Multivariado precipitación-escorrentía-humedad-9 meses | 6.871 | -2.615 | -13.239 | 727 |
| Multivariado precipitación-escorrentía-humedad-12 meses | 14.113 | -2.841 | -28.188 | 319 |
| Multivariado precipitación-escorrentía-humedad-18 meses | 9.305 | -2.837 | -18.223 | 518 |
| Multivariado precipitación-escorrentía-humedad-24 meses | 20.322 | -2.718 | -40.028 | 202 |

Por otra parte, en la Figura 34 es posible observar el comportamiento en promedio de la serie temporal en una escala nacional para el índice estandarizado de precipitación (IEP). En la gráfica se identifica que en función de mayor agregación son menos los eventos identificados, entendiendo la ocurrencia de eventos como el periodo en el cual el índice analizado alcanza un valor menor a -0.5 y, a su vez, disminuye la magnitud de los eventos; desde el punto de vista de análisis de una sola variable, en este caso la precipitación, con diferentes periodos de agregación.

La Figura 35 integra índices univariados de precipitación, escorrentía y humedad; a su vez, incluye el índice multivariado de precipitación, escorrentía y humedad del suelo, con un periodo de agregación de 24 meses. En la gráfica se observa cómo el índice multivariado articula los tres univariados, permitiendo establecer el inicio y el fin de los procesos de sequía e incorpora la duración y la magnitud calculada de manera independiente para cada una de las variables. El uso de índices multivariados permite la evaluación integral del proceso de sequía incluyendo en un solo índice el comportamiento de las variables en análisis, en este caso, componentes del ciclo hidrológico (precipitación, humedad del suelo y escorrentía).

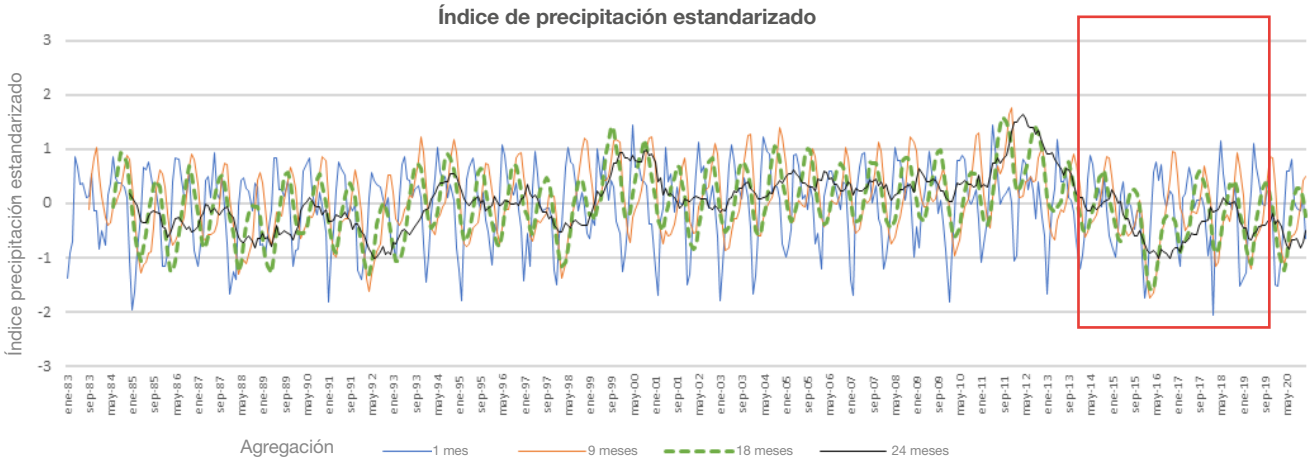



Figura 34. Series temporales correspondientes a los índices de precipitación con diferentes periodos de agregación.

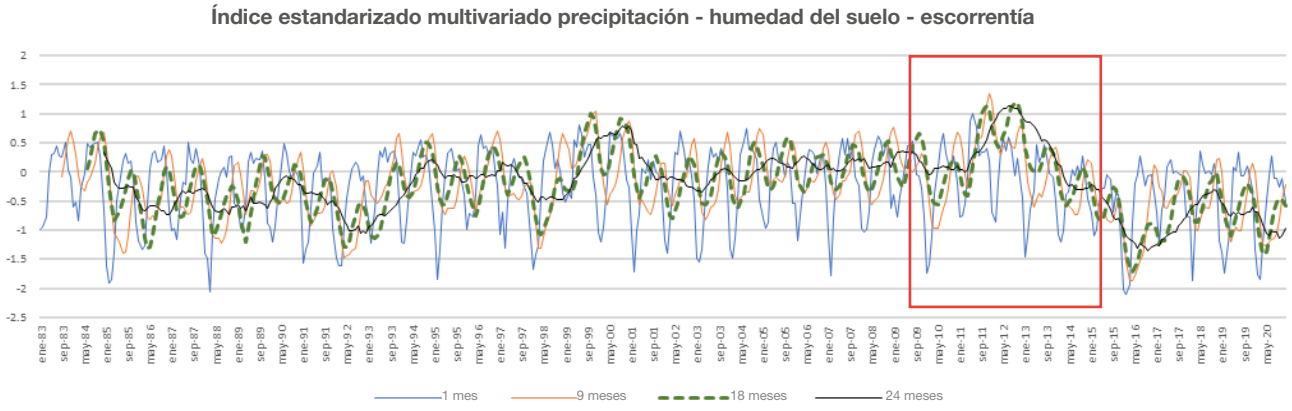



Figura 35. Índice multivariado, con diferentes periodos de agregación.

Considerando el mayor periodo de agregación analizado, 24 meses, se identifica con claridad un evento con una duración importante en términos del territorio nacional que inicia en el año 2015 y culmina cerca de 2018. De esta forma, se puede verificar que el índice ONI (ver Figura 36 y Figura 37) evidencia un fenómeno de El Niño a partir de octubre de 2014, con una duración hasta abril de 2016. En este sentido, resulta claro ver cómo el índice univariado de precipitación inicia su ascenso antes de los dos índices univariados correspondientes a humedad del suelo y escorrentía; lo anterior, permite identificar la utilidad de los índices multivariados.

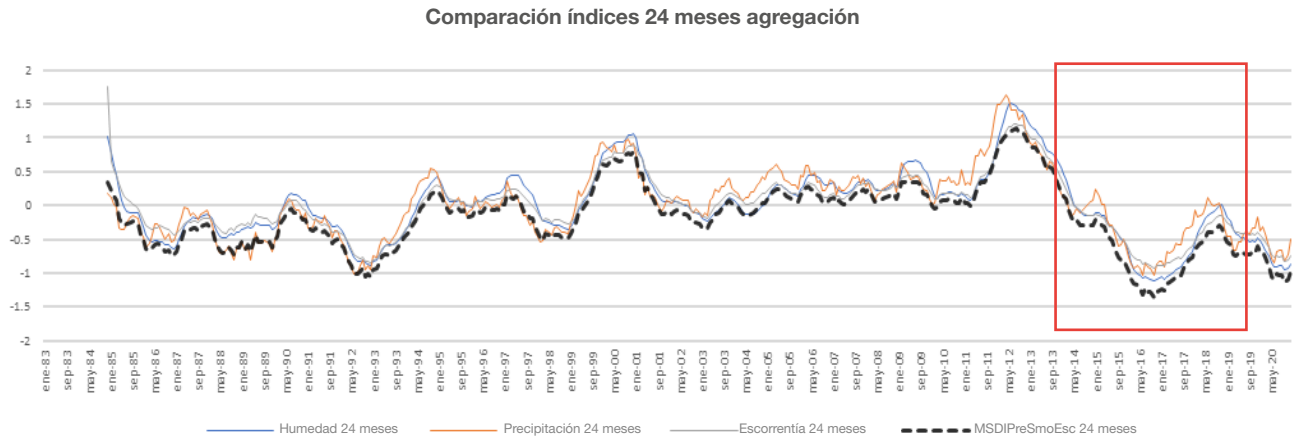



Figura 36. Índices univariados e índice multivariado para Colombia en agregación de 24 meses.

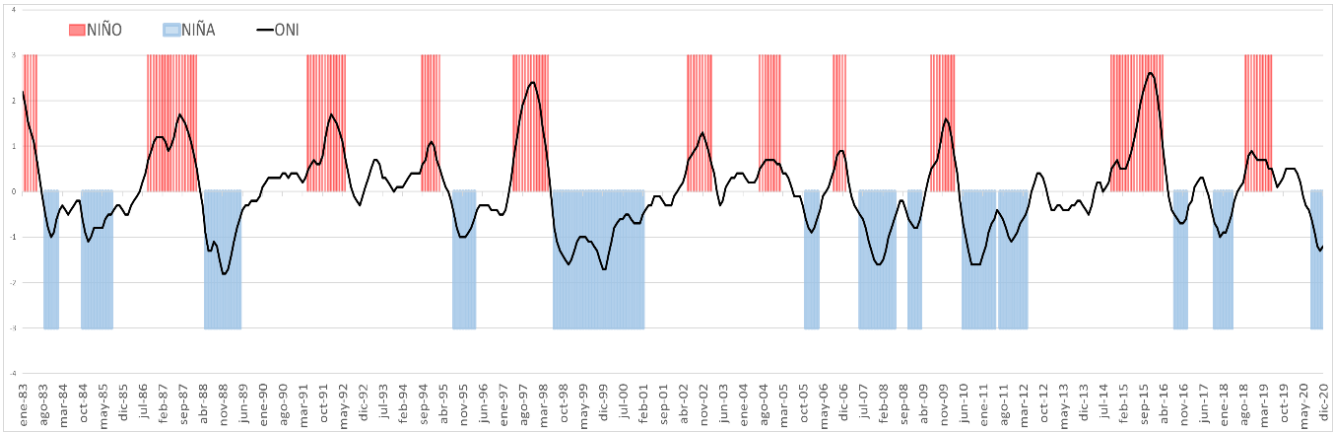



Figura 37. Eventos de El Niño y La Niña a partir del indicador ONI.

Tomando como referencia el evento de 2016, la Tabla 17 muestra, a manera de resumen, la forma como cada índice da cuenta de los efectos sobre el territorio como consecuencia del evento. Se observa que las duraciones identificadas por parte de los índices univariados son menores que los correspondientes a los índices multivariados; de igual manera, la incidencia sobre la clasificación del evento de acuerdo con su intensidad, siendo el mínimo el establecido por parte del índice multivariado precipitación-escorrentía, con periodo de agregación de 24 meses.

Tabla 17. Resumen de evento de sequía identificado en 2016, índices con periodo de agregación de 24 meses.

| Inicio | Final | Duración | Magnitud | Mínimo | Indicador |
|---|---|---|---|---|---|
| Sep-15 | Ago-17 | 24 | -36.0423 | -1.0261 | Precipitación-24 meses |
| Nov-15 | Ene-18 | 27 | -40.6612 | -0.9237 | Escorrentía-24 meses |
| Nov-15 | Ene-18 | 27 | -48.5747 | -1.1187 | Humedad del suelo-24 meses |
| May-15 | May-18 | 37 | -76.9724 | -1.4987 | Multivariado precipitación-humedad-24 meses |
| May-15 | May-18 | 37 | -83.1428 | -1.6371 | Multivariado precipitación-escorrentía-24 meses |
| Jun-15 | Abr-18 | 35 | -70.9261 | -1.4151 | Multivariado precipitación-escorrentía-humedad-24 meses |
| Jul-15 | Abr-18 | 34 | -66.5374 | -1.3547 | Multivariado precipitación-humedad-escorrentía-24 meses |

Tomando como referencia la Tabla 17 donde se caracteriza el evento ocurrido en el 2016, y analizando los índices calculados en un periodo de agregación de 24 meses, se evidencia cómo el índice multivariado identifica el evento meses antes que los índices univariados, con periodos de hasta cuatro meses de antelación para esta agregación en particular; así mismo, su terminación se identifica tres o cuatro meses después de lo registrado en los índices univariados. Esto como resultado de la metodología de probabilidades conjuntas de los tres índices univariados; se observa la forma en que, a partir de 2012, los tres índices univariados evidencian un comportamiento descendente, lo cual incide en acentuar el índice multivariado hacia valores negativos, lo que implica llegar al valor del umbral de -0.5 antes que los índices univariados. Lo anterior en función de integrar los índices univariados en una serie temporal.

En este sentido, es claro que el uso de estos índices multivariados permite hacer un seguimiento integral sobre el ciclo hidrológico y sus principales componentes, con índices de interpretación sencilla con la correspondiente espacialización sobre el territorio; así se hace seguimiento a la propagación del evento sobre los componentes del ciclo y su incidencia en los territorios, elemento fundamental de apoyo en la toma de decisiones.

Finalmente, la espacialización para un periodo de tiempo entre mayo de 2016 y julio de 2017 evidencia la forma en que el índice multivariado estandarizado de precipitación humedad del suelo - escorrentía, agregación de 24 meses, evoluciona y se extiende en el territorio nacional, tomando como inicio el mes de mayo de 2016 y hasta julio de 2017, como lo muestran los mapas de la Figura 38. Es posible evidenciar el alcance del fenómeno en diferentes regiones del país para una agregación de 24 meses, donde el índice multivariado (precipitación-humedad del suelo-escorrentía) alcanza un valor de -1.415, siendo el más bajo de toda la serie presentado en octubre de 2016.

En términos de la clasificación establecida, se llega a una sequía severa. Sin embargo, es importante resaltar que el valor del índice en el caso del territorio colombiano es obtenido como resultado de la mediana de todas las celdas que están contenidas en el país y que tienen la información de base, es decir, cerca de 37.000.

Es posible identificar la extensión espacial del evento en 2016 con el uso de la Figura 33 y el correspondiente análisis del IEMS en la Figura 38. Se resalta un alcance espacial de hasta el 75 % en el país en condición de sequía en alguna de sus clasificaciones (Tabla 13). En este sentido, en la Figura 38 se evidencia la evolución espacial del evento de sequía ocurrido durante 2016 a partir del IEMS precipitación-humedad del suelo-escorrentía, con periodo de agregación de 24 meses, donde se observa la evolución del evento, en particular en la región de la Amazonía, iniciando en tonos fríos —que evidencian normalidad en la condición— y evolucionando paulatinamente a tonos naranjas y rojos en función del valor del índice multivariado y de la correspondiente intensidad del evento.

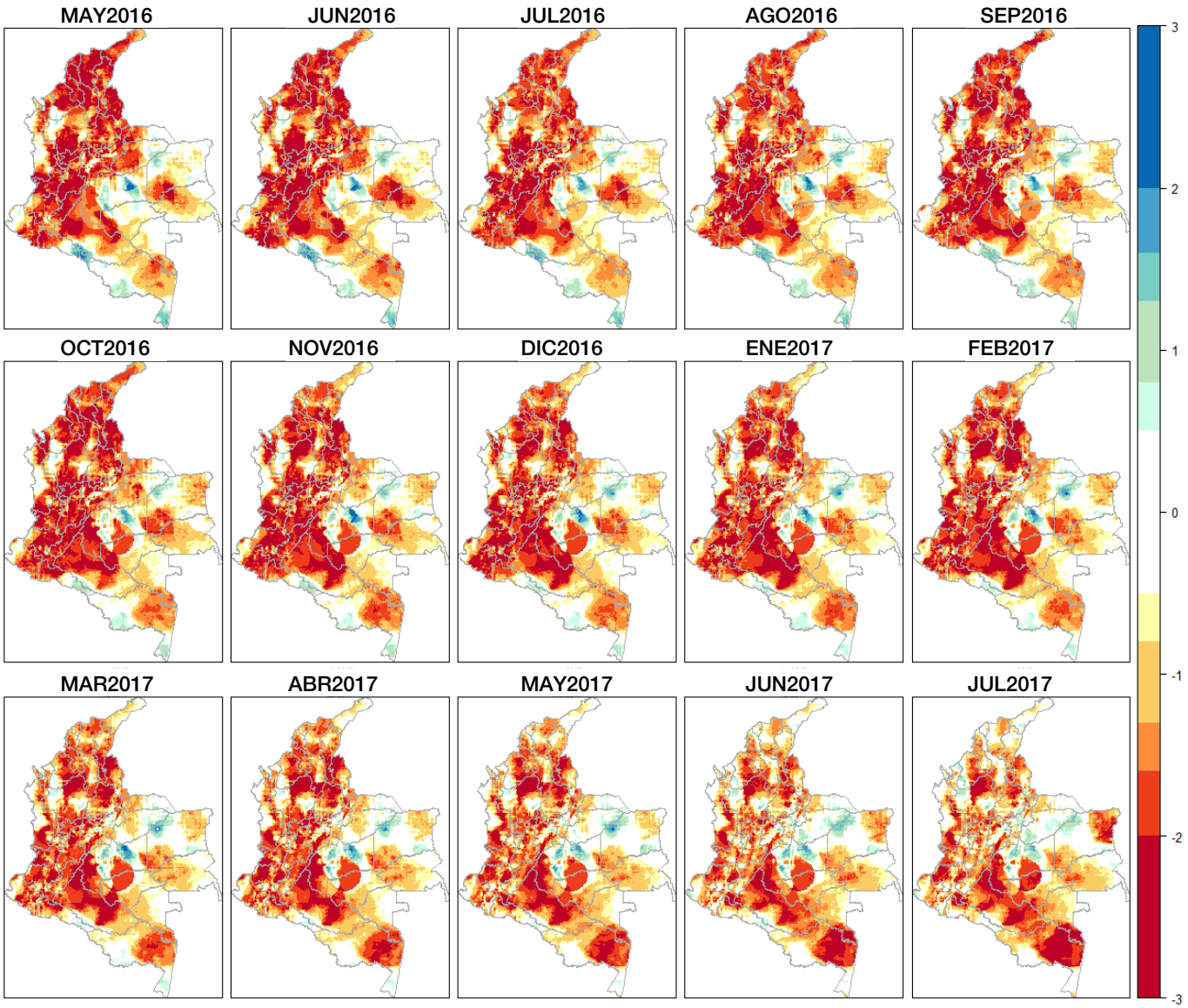



Figura 38. Evolución espaciotemporal del índice multivariado (IEMS) precipitación-humedad del suelo-escorrentía entre mayo de 2016 y julio de 2017, para un periodo de agregación de 24 meses.

### 3.2.3.2 Análisis de eventos de sequía a nivel de zonas hidrográficas

A nivel de zona hidrográfica, se identifican 22.248 eventos, de los cuales 6010 son evidenciados con la aplicación de índices multivariados, mientras que con el uso de índices univariados se identifican 16.238 eventos de sequía. Se incluyen análisis para 38 zonas hidrográficas en el territorio nacional que cuentan con información generada dentro del proceso. La consolidación de la totalidad de los eventos encontrados a nivel de cada una de las zonas hidrográficas mencionadas se presenta en la Tabla 18 para los índices univariados y multivariados.

A su vez, se discriminan los eventos identificados de acuerdo con cada agregación temporal incluida en el ejercicio. Como se indicó antes, es claro que en la medida en que las agregaciones temporales aumentan la identificación de eventos es menor. La Figura 39 permite evidenciar de manera específica en niveles de zonas hidrográficas el número de eventos que se encontraron a partir de los índices de precipitación para los diferentes periodos de agregación.

Tabla 18. Eventos de sequía identificados, clasificados por índices multivariados (MV) y por índices univariados (UV).

| Zona hidrográfica | 1 mes | 3 meses | 6 meses | 9 meses | 12 meses | 18 meses | 24 meses | 1 mes | 3 meses | 6 meses | 9 meses | 12 meses | 18 meses | 24 meses |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Atrato-Darién | 90 | 92 | 74 | 57 | 32 | 46 | 22 | 34 | 33 | 29 | 19 | 9 | 16 | 6 |
| Caribe-litoral | 103 | 100 | 86 | 62 | 28 | 54 | 19 | 37 | 37 | 32 | 22 | 13 | 20 | 8 |
| Sinú | 107 | 107 | 91 | 76 | 29 | 64 | 22 | 38 | 37 | 34 | 28 | 6 | 25 | 5 |
| Caribe-Guajira | 110 | 100 | 88 | 78 | 33 | 50 | 20 | 45 | 39 | 33 | 29 | 12 | 19 | 6 |
| Catatumbo | 971 | 87 | 60 | 56 | 27 | 29 | 17 | 42 | 34 | 23 | 19 | 8 | 10 | 7 |
| Alto Magdalena | 90 | 86 | 39 | 47 | 24 | 21 | 15 | 44 | 37 | 17 | 19 | 9 | 8 | 6 |
| Saldaña | 101 | 96 | 55 | 56 | 32 | 30 | 15 | 38 | 37 | 20 | 24 | 11 | 7 | 5 |
| Medio Magdalena | 100 | 94 | 66 | 63 | 31 | 34 | 19 | 42 | 40 | 20 | 23 | 10 | 11 | 6 |
| Sogamoso | 88 | 82 | 47 | 50 | 27 | 26 | 16 | 38 | 38 | 20 | 20 | 10 | 7 | 5 |
| Bajo Magdalena-Cauca-San Jorge | 104 | 102 | 83 | 66 | 28 | 61 | 20 | 36 | 36 | 32 | 23 | 10 | 23 | 6 |
| Cauca | 90 | 94 | 47 | 56 | 30 | 20 | 18 | 37 | 39 | 15 | 21 | 10 | 8 | 6 |
| Mechi | 103 | 103 | 83 | 61 | 17 | 43 | 13 | 38 | 37 | 28 | 21 | 6 | 17 | 5 |
| Cesar | 101 | 98 | 76 | 67 | 30 | 50 | 21 | 45 | 37 | 27 | 22 | 11 | 16 | 5 |
| Bajo Magdalena | 104 | 100 | 84 | 62 | 31 | 53 | 19 | 41 | 36 | 32 | 22 | 9 | 19 | 6 |
| Inírida | 106 | 104 | 97 | 71 | 21 | 61 | 11 | 37 | 35 | 34 | 28 | 8 | 21 | 3 |
| Guaviare | 110 | 108 | 99 | 72 | 26 | 68 | 17 | 38 | 38 | 35 | 30 | 9 | 27 | 7 |
| Vichada | 112 | 110 | 104 | 81 | 33 | 80 | 22 | 37 | 37 | 36 | 29 | 15 | 29 | 7 |
| Tomo | 112 | 110 | 101 | 80 | 42 | 77 | 33 | 37 | 37 | 35 | 30 | 14 | 28 | 10 |
| Meta | 112 | 111 | 100 | 82 | 36 | 80 | 28 | 37 | 37 | 35 | 30 | 11 | 29 | 8 |
| Casanare | 112 | 111 | 104 | 78 | 27 | 70 | 28 | 37 | 37 | 36 | 30 | 11 | 27 | 12 |
| Arauca | 101 | 100 | 93 | 74 | 32 | 64 | 24 | 33 | 35 | 32 | 26 | 12 | 25 | 8 |
| Orinoco directos | 110 | 108 | 105 | 90 | 36 | 87 | 25 | 37 | 38 | 35 | 34 | 13 | 32 | 17 |
| Apure | 102 | 96 | 89 | 66 | 27 | 54 | 18 | 34 | 34 | 30 | 23 | 8 | 21 | 9 |
| Guainía | 93 | 99 | 91 | 66 | 24 | 52 | 21 | 36 | 34 | 34 | 25 | 7 | 20 | 5 |
| Vaupés | 99 | 98 | 89 | 66 | 22 | 49 | 17 | 38 | 35 | 32 | 25 | 7 | 19 | 5 |
| Apaporis | 96 | 98 | 83 | 60 | 25 | 53 | 16 | 37 | 35 | 34 | 26 | 10 | 20 | 6 |
| Caquetá | 92 | 84 | 83 | 59 | 32 | 51 | 17 | 34 | 34 | 29 | 24 | 12 | 18 | 7 |
| Yari | 105 | 106 | 86 | 68 | 28 | 57 | 20 | 38 | 37 | 33 | 22 | 10 | 21 | 9 |
| Caguán | 109 | 96 | 76 | 52 | 27 | 40 | 16 | 37 | 33 | 28 | 17 | 13 | 14 | 10 |
| Putumayo | 78 | 74 | 65 | 54 | 34 | 44 | 17 | 34 | 32 | 29 | 20 | 14 | 18 | 9 |
| Amazonas directos | 92 | 83 | 70 | 50 | 34 | 41 | 26 | 37 | 33 | 27 | 18 | 11 | 16 | 10 |
| Napo | 75 | 71 | 58 | 46 | 32 | 28 | 21 | 25 | 22 | 19 | 16 | 11 | 9 | 7 |
| Mira | 87 | 82 | 72 | 60 | 39 | 40 | 27 | 34 | 30 | 30 | 24 | 15 | 15 | 12 |
| Patía | 95 | 94 | 64 | 65 | 35 | 42 | 25 | 39 | 36 | 25 | 24 | 13 | 17 | 9 |
| Tapaje-Dagua-directos | 94 | 70 | 26 | 28 | 13 | 9 | 10 | 47 | 36 | 16 | 15 | 10 | 8 | 3 |
| San Juan | 80 | 73 | 46 | 40 | 19 | 22 | 14 | 35 | 32 | 17 | 14 | 5 | 6 | 3 |
| Baudó-directos Pacífico | 86 | 82 | 58 | 41 | 22 | 26 | 10 | 30 | 27 | 20 | 15 | 7 | 7 | 4 |
| Pacífico-Directos | 102 | 92 | 77 | 44 | 22 | 32 | 10 | 36 | 33 | 26 | 15 | 6 | 12 | 3 |
| | Índices univariados | | | | | | | Índices multivariados | | | | | | |

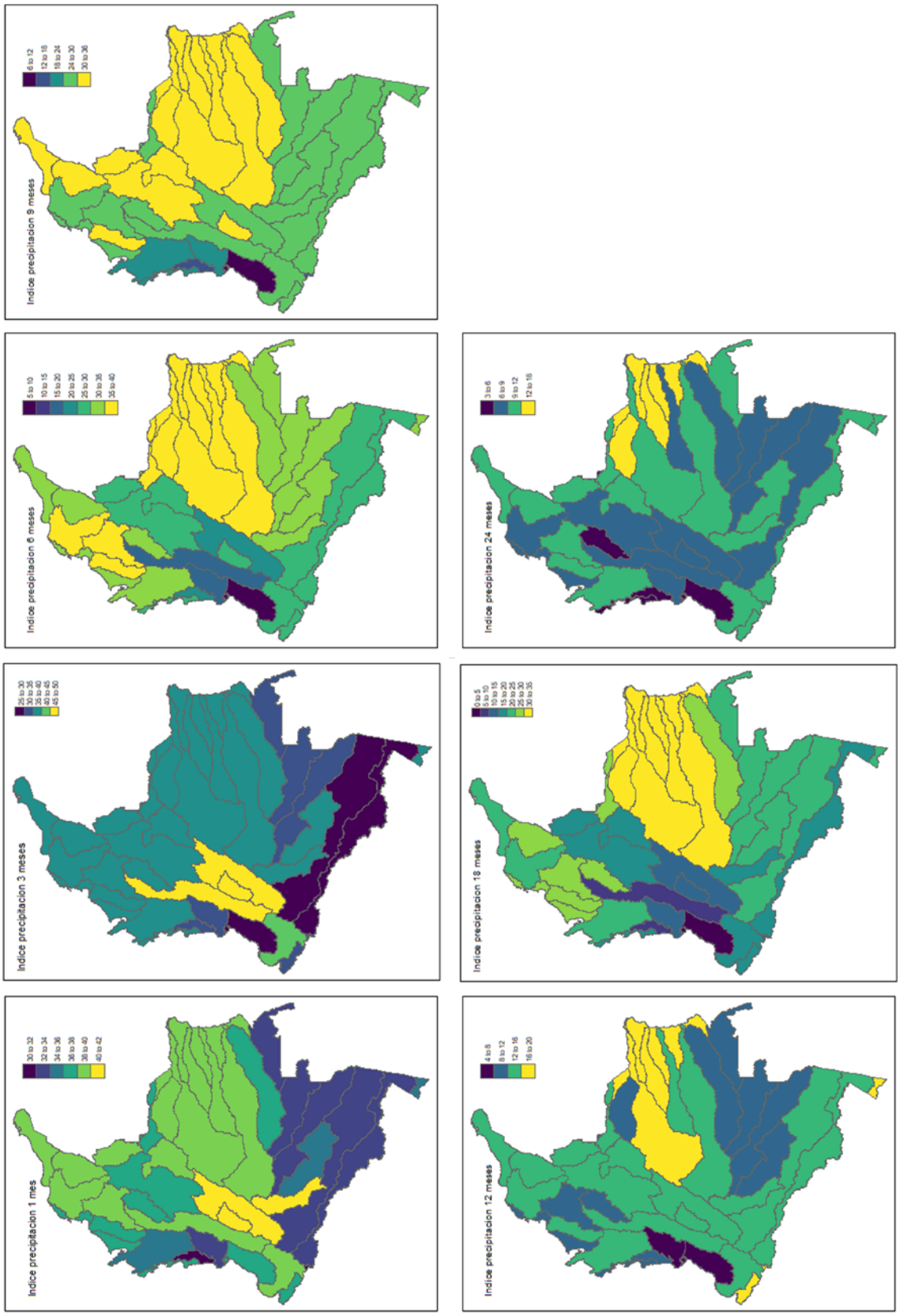



Figura 39. Número de eventos de sequía identificados usando el índice de precipitación para diferentes agregaciones temporales, a nivel de zona hidrográfica.

De acuerdo con los datos obtenidos, las zonas hidrográficas donde se identifica mayor número de eventos de sequía corresponde a la zona que incluye Orinoco directos, Tomo, Meta, Vichada, Guaviare, Sinú y Caribe-Guajira, con un porcentaje por encima del 30 % respecto al promedio de eventos identificados para las zonas hidrográficas en el país, lo que corresponde a 585. Así mismo, las zonas que menor número de eventos evidencian corresponden a Tapaje-Dagua, San Juan y Baudó directos Pacífico, con eventos correspondientes a un porcentaje cercano al 30 % por debajo de la media del total de eventos.

Los eventos de mayor duración identificados con el apoyo del índice multivariado de precipitación humedad del suelo-escorrentía, con agregación de 24 meses, corresponden con los ocurridos en las zonas hidrográficas de Guainía en los meses de diciembre de 1984 a agosto de 1990. En estos eventos, el mínimo valor del índice multivariado fue de -2.603 (sequía excepcional, según la Tabla 13) con una duración de 69 meses; en la zona hidrográfica de Amazonas directos se dio un evento que inició en junio de 1995 y culminó en enero de 2002, con un valor mínimo del índice de -2 y una duración de 80 meses; en la zona de Baudó-directos Pacífico ocurrió un evento que inició en diciembre de 1984, con terminación en marzo de 1993, para una duración total de 100 meses; y, en la zona de Pacífico-directos, se evidenció un evento que inició en diciembre de 1984 y finalizó en octubre de 1995, con una duración de 131 meses; el rango de clasificación para estos eventos en los valores mínimos del índice alcanzaron la clasificación de *sequía excepcional*, de acuerdo con la clasificación establecida en la Tabla 13.

La Figura 40 muestra la forma en que el evento identificado en diciembre de 1984 persiste en la zona hidrográfica correspondiente a Baudó directos Pacífico, que alcanza una clasificación entre las sequías excepcionales, y cómo el evento se encuentra extendido en un porcentaje importante del territorio de la zona hidrográfica, alcanzando incluso porcentajes mayores al 75 %. Es claro notar que, en la primera parte del periodo de tiempo analizado, es decir, a partir de diciembre de 1984 y hasta 1995, el índice multivariado evidencia una condición de sequía en la zona hidrográfica, y a partir de los años siguientes no se presenta una condición similar.

El uso del índice multivariado con agregación temporal de 24 meses permite hacer un análisis sobre la forma en que los eventos de mayor magnitud generan reducción en la disponibilidad de los componentes del ciclo hidrológico (precipitación,

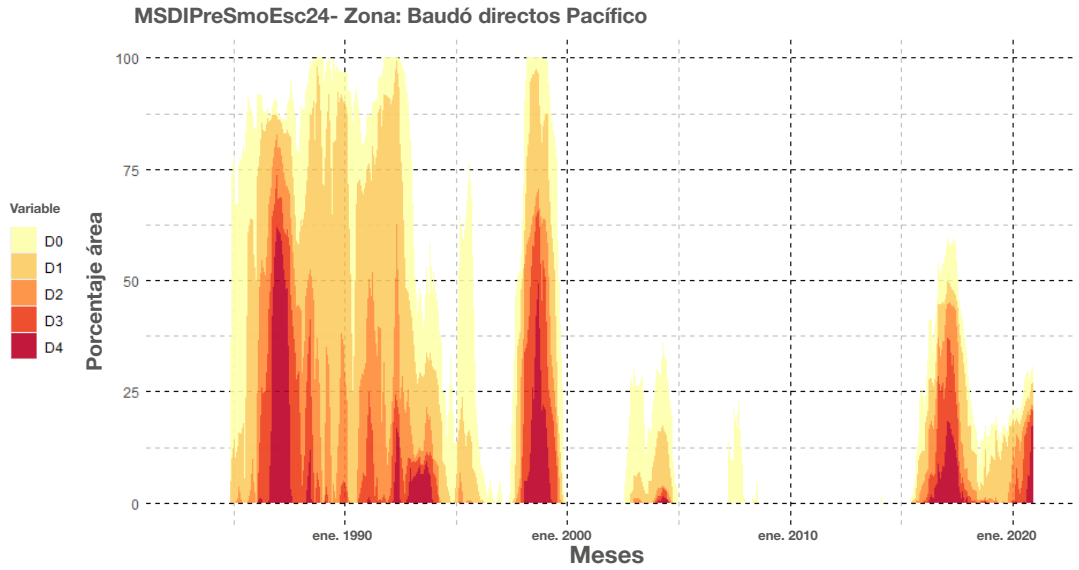



Figura 40. Porcentaje área zona hidrográfica Baudó directos Pacífico para cada categoría de intensidad de sequía, periodo 1983-2020, índice estandarizado univariado, precipitación con periodo de agregación de 24 meses.

escorrentía y humedad del suelo) afectando su normalidad. Es decir, los índices alcanzan valores negativos inferiores a los umbrales establecidos en la Tabla 13 para identificar eventos de sequía; valores inferiores a -0.5 que denotan la ocurrencia de periodos en los cuales se presentan eventos de sequía en mayor o menor magnitud, en concordancia con los valores de los índices calculados y su respectiva clasificación.

Como se muestra en la gráfica de la Figura 41, acorde con la identificación del evento más crítico se puede evaluar el comportamiento del índice multivariado en la zona hidrográfica de análisis durante todo el periodo, es decir, de 1983 a 2020. El cuadro rojo resalta el periodo en el cual fue identificado el evento mencionado y es la ventana que será analizada con los índices univariados a fin de evidenciar la forma como se propaga el evento en cada uno de los diferentes componentes del ciclo hidrológico.

Las gráficas de la Figura 42 permiten visualizar los índices univariados para los diferentes periodos de agregación y los correspondientes índices multivariados para la zona Baudó directos Pacífico, y el periodo de análisis entre 1985 y 1993. En la gráfica se evidencia de manera clara la forma como el evento de sequía analizado, a partir de agregaciones de 24 meses (gráfica a la derecha), presentó su mayor intensidad durante los años de 1986 a 1988.

En términos del alcance espacial en el punto más crítico del evento, es decir, el mes en el cual se identifica el índice de menor valor, en este caso, febrero de 1987, la Figura 43 muestra cómo las zonas que se encuentran en una clasificación de D4 sequía excepcional (Tabla 13) están ubicadas al norte de la zona hidrográfica, en jurisdicción de los municipios de Alto Baudó, Medio Baudó, y gran parte de Bajo Baudó, llegando a porcentajes de alcance en la zona de hasta el 60 % del territorio en condición de sequía extrema.

Las fechas coinciden con los eventos más críticos que se logran evidenciar desde el contexto nacional, e incluso a niveles departamentales, identificando la temporada del año 1987 como una condición crítica en el país que coincide con el evento de El Niño que se presentó durante los meses de septiembre de 1986 a febrero de 1988, de acuerdo con el índice ONI (Oceanic Niño Index).

Se incluyen en el **Anexo 3a** resultados para cada uno de los índices (univariados y multivariados), de manera análoga a lo señalado a niveles espaciales de zonas hidrográficas para las correspondientes subzonas hidrográficas.

Con la metodología descrita, fue posible identificar 179.191 eventos con una agregación espacial de subzona hidrográfica; de ellos, se hallaron 131.790 eventos con índices univariados y, con el apoyo del índice multivariado (IEMS, precipitación-humedad del suelo-escorrentía), se encontraron 47.401; lo anterior, para los diferentes periodos de agregación usados.

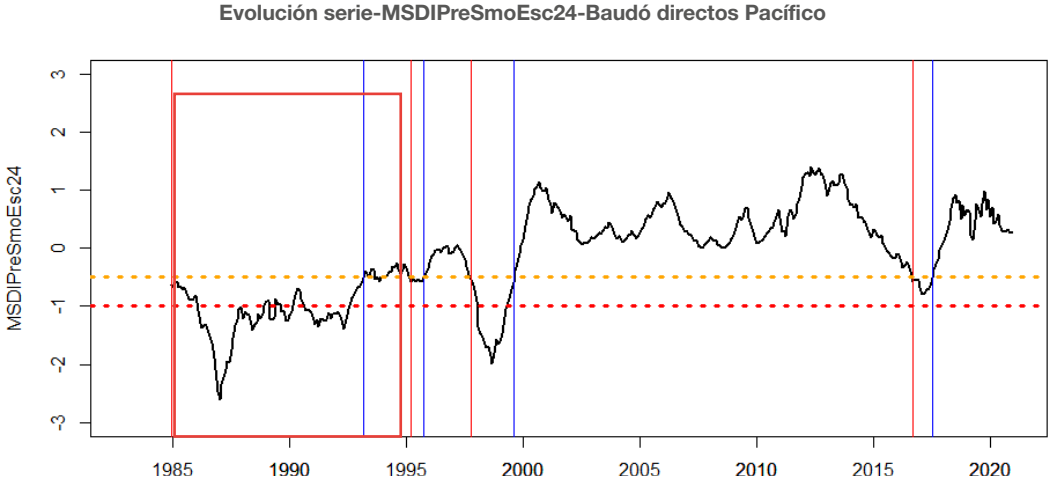



Figura 41. Serie temporal índice multivariado (IEMS) de zona hidrográfica Baudó directos Pacífico.

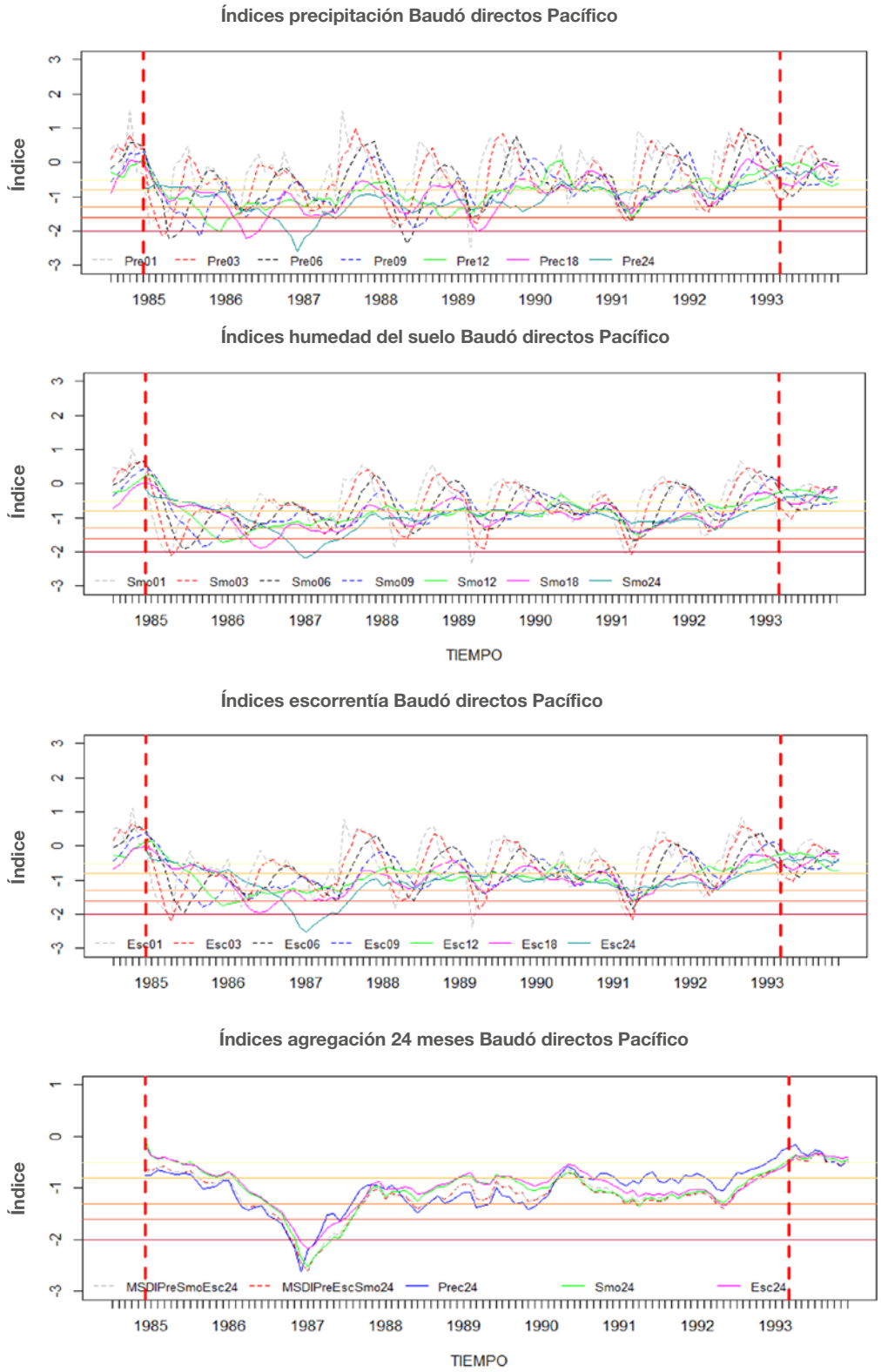



Figura 42. Series de índices multivariados y univariados para el departamento del Chocó, ventana temporal de 1984 a 1994.

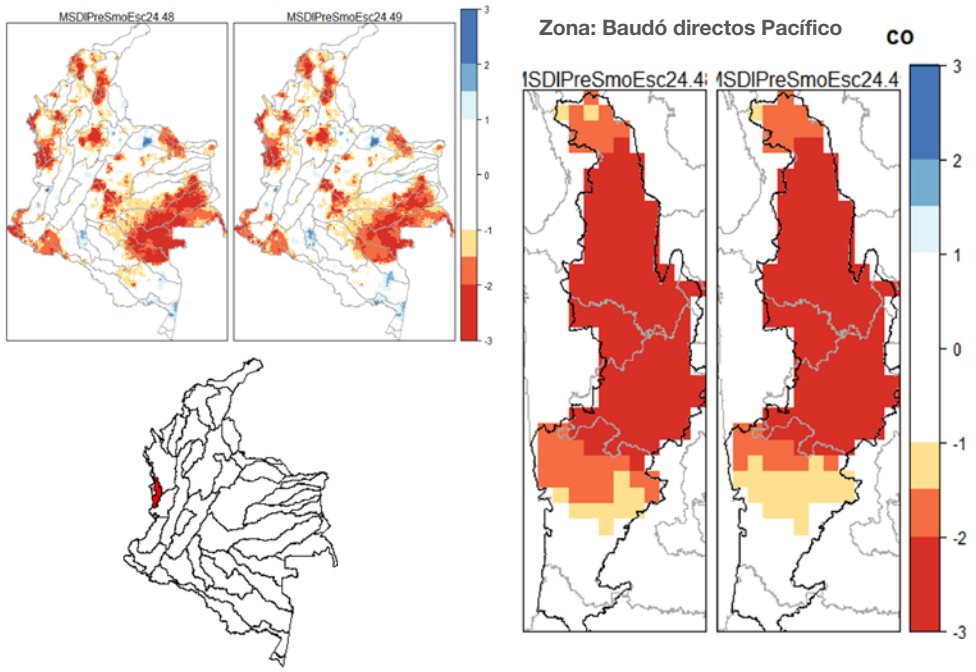



Figura 43. Espacialización índice multivariado precipitación humedad del suelo - escorrentía, con agregación 24 meses, meses de febrero y marzo de 1987.

Las subzonas con mayor número de eventos fueron: el caño Matavén y otros directos al Orinoco, con 770 eventos en total; el río Tuparro y otros directos al Orinoco, con 756; el Caño Cumaral, con 755. A su vez, las subzonas identificadas con menor número de eventos fueron: la subzona del río Naya con 308 eventos; río Cajambre, con 329; río Caguán Alto, con 336, y río Capona, con 354 eventos.

### 3.2.3.3 Análisis de eventos de sequía a nivel departamental

En términos departamentales, los índices seleccionados permiten hacer comparaciones acerca de la forma como los eventos de sequía afectan los territorios del país en términos de su intensidad y duración, y de acuerdo con la identificación y consolidación de los eventos a través de la implementación de los diferentes índices, tanto univariados como multivariados, y sus diferentes agregaciones temporales.

Con el propósito de establecer un punto de comparación para los diferentes niveles espaciales de análisis se usó la relación dada por la sumatoria total de los eventos que se evidencian con cada índice y el número de meses totales en los cuales la región se encuentra en condición de sequía.

En la Tabla 19, se consolida la información correspondiente a eventos en los diferentes departamentos del país que alcanzan un total de 18.000 eventos, de los cuales cerca de 13.000 se evidencian con la implementación de índices univariados (precipitación, humedad del suelo y escorrentía) y los restantes con el índice multivariado de precipitación-humedad del suelo-escorrentía, para los diferentes periodos de agregación utilizados.

Del análisis de la información generada es posible identificar que el mayor número de eventos en el periodo de análisis fue encontrado en el departamento del Vichada, con un número de 748, un 29 % por encima del promedio de eventos; en los departamentos de Arauca y Casanare, con 734 y 733 eventos, un porcentaje por encima del promedio de 26 %; y en el departamento del Meta, con 714 eventos y un porcentaje de 23 % por encima del promedio de los departamentos. En este sentido, la Figura 44 permite establecer una comparación en términos departamentales del número de eventos que se identifican a partir de los índices univariados de precipitación para cada nivel de agregación.

Tabla 19. Eventos en análisis departamental para diferentes índices.

| Departamento | 1 mes | 3 meses | 6 meses | 9 meses | 12 meses | 18 meses | 24 meses | 1 mes | 3 meses | 6 meses | 9 meses | 12 meses | 18 meses | 24 meses | Total eventos |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Amazonas | 81 | 81 | 69 | 55 | 31 | 49 | 22 | 33 | 33 | 28 | 19 | 15 | 17 | 8 | 541 |
| Antioquia | 98 | 98 | 77 | 66 | 29 | 47 | 22 | 38 | 36 | 28 | 22 | 8 | 16 | 5 | 590 |
| Arauca | 112 | 109 | 104 | 75 | 34 | 83 | 24 | 37 | 37 | 36 | 29 | 15 | 30 | 9 | 734 |
| Atlántico | 108 | 102 | 88 | 59 | 28 | 52 | 25 | 40 | 40 | 32 | 21 | 9 | 19 | 8 | 631 |
| Bolívar | 104 | 102 | 88 | 61 | 28 | 52 | 17 | 38 | 36 | 33 | 23 | 11 | 19 | 6 | 618 |
| Boyacá | 90 | 91 | 61 | 48 | 25 | 36 | 15 | 35 | 34 | 28 | 23 | 10 | 16 | 11 | 523 |
| Caldas | 103 | 98 | 42 | 55 | 28 | 21 | 18 | 40 | 35 | 15 | 18 | 10 | 6 | 5 | 494 |
| Caquetá | 107 | 104 | 87 | 71 | 28 | 58 | 19 | 38 | 37 | 33 | 24 | 11 | 24 | 8 | 649 |
| Casanare | 112 | 110 | 102 | 86 | 33 | 79 | 25 | 37 | 37 | 35 | 31 | 11 | 28 | 7 | 733 |
| Cauca | 96 | 89 | 49 | 50 | 24 | 32 | 16 | 43 | 36 | 19 | 21 | 11 | 14 | 5 | 505 |
| Cesar | 99 | 92 | 71 | 64 | 31 | 46 | 21 | 44 | 36 | 27 | 24 | 10 | 15 | 8 | 588 |
| Chocó | 87 | 83 | 73 | 47 | 20 | 38 | 16 | 31 | 29 | 26 | 19 | 9 | 13 | 4 | 495 |
| Córdoba | 106 | 105 | 91 | 70 | 23 | 64 | 21 | 38 | 36 | 34 | 26 | 7 | 25 | 6 | 652 |
| Cundinamarca | 90 | 91 | 40 | 52 | 27 | 28 | 17 | 37 | 42 | 17 | 21 | 10 | 7 | 5 | 484 |
| Guainía | 97 | 96 | 94 | 75 | 29 | 67 | 20 | 37 | 34 | 35 | 27 | 10 | 21 | 4 | 646 |
| Guaviare | 111 | 106 | 97 | 68 | 29 | 58 | 18 | 38 | 37 | 35 | 27 | 10 | 24 | 6 | 664 |
| Huila | 86 | 76 | 39 | 39 | 25 | 21 | 13 | 42 | 33 | 14 | 16 | 10 | 8 | 5 | 427 |
| La Guajira | 108 | 103 | 85 | 79 | 36 | 48 | 19 | 44 | 39 | 32 | 30 | 12 | 18 | 6 | 659 |
| Magdalena | 102 | 101 | 83 | 60 | 32 | 52 | 25 | 42 | 38 | 32 | 23 | 8 | 18 | 7 | 623 |
| Meta | 111 | 110 | 100 | 74 | 33 | 76 | 22 | 37 | 37 | 35 | 28 | 13 | 30 | 8 | 714 |
| Nariño | 90 | 89 | 61 | 61 | 27 | 36 | 29 | 38 | 38 | 22 | 23 | 12 | 12 | 8 | 546 |
| Norte Santander | 93 | 87 | 60 | 58 | 25 | 29 | 15 | 39 | 35 | 23 | 20 | 7 | 10 | 6 | 507 |
| Putumayo | 86 | 85 | 76 | 56 | 23 | 38 | 15 | 34 | 31 | 30 | 23 | 8 | 17 | 7 | 529 |
| Quindío | 104 | 100 | 52 | 58 | 29 | 26 | 13 | 37 | 34 | 21 | 23 | 12 | 9 | 5 | 523 |
| Risaralda | 93 | 88 | 46 | 65 | 32 | 22 | 20 | 37 | 35 | 14 | 19 | 11 | 8 | 7 | 497 |
| Santander | 93 | 91 | 60 | 67 | 28 | 33 | 20 | 41 | 41 | 22 | 25 | 8 | 12 | 8 | 549 |
| Sucre | 99 | 95 | 84 | 60 | 23 | 60 | 17 | 38 | 36 | 32 | 20 | 8 | 21 | 4 | 597 |
| Tolima | 102 | 96 | 55 | 54 | 34 | 36 | 17 | 42 | 36 | 19 | 23 | 11 | 7 | 5 | 537 |
| Valle del Cauca | 91 | 91 | 37 | 52 | 26 | 22 | 13 | 41 | 39 | 18 | 21 | 9 | 7 | 7 | 474 |
| Vaupés | 83 | 90 | 85 | 61 | 20 | 43 | 14 | 34 | 33 | 31 | 25 | 9 | 16 | 3 | 547 |
| Vichada | 111 | 109 | 105 | 85 | 32 | 84 | 21 | 38 | 38 | 36 | 33 | 14 | 31 | 11 | 748 |
| | Índices univariados | | | | | | | Índices multivariados | | | | | | | |

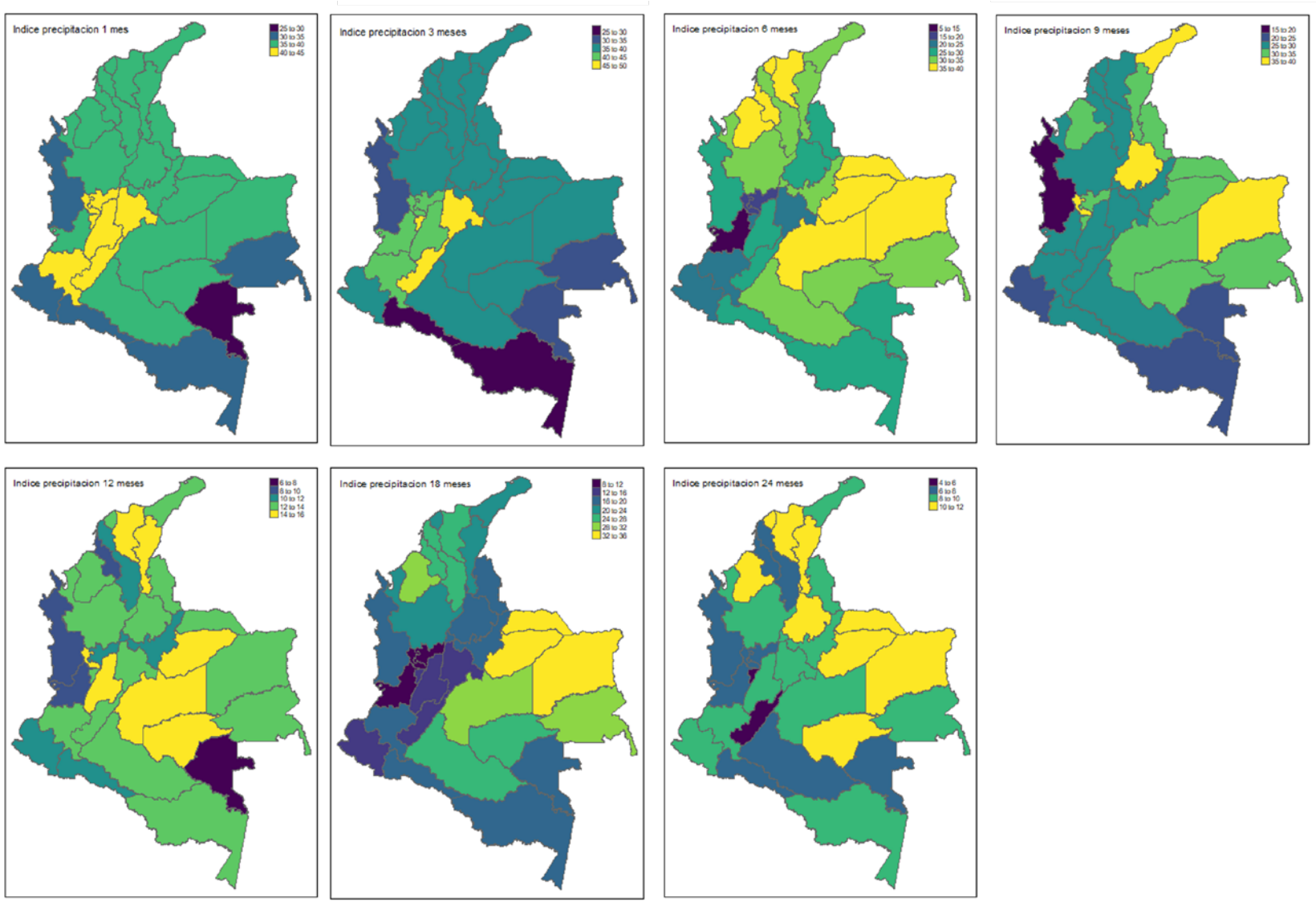



Figura 44. Número de eventos de sequía identificados para diferentes periodos de agregación, usando el índice de precipitación, y a nivel departamental.

Con respecto a la intensidad de los fenómenos, a partir del uso del índice multivariado precipitación-humedad-escorrentía se identifican cuatro eventos de mayor intensidad: (a) en el departamento del Chocó, con una duración de más de 100 meses entre diciembre de 1985 y mayo de 1994, con un valor del índice multivariado de precipitación-humedad-escorrentía con agregación de 24 meses de -1.594, dato que lo ubica en un rango D2, de sequía severa (ver Tabla 13), según la notación usada en este ejercicio; (b) de igual manera, un evento en el departamento de Guainía, con duración de 65 meses, pero cuyo mismo índice multivariado alcanza un valor mínimo de -2.140, lo que indica una sequía excepcional, rango D5 (ver Tabla 13); (c) en el departamento del Vaupés, para los meses de enero de 1985 a julio de 1989, con valor mínimo del IEMS de -2.35; y (d) en el departamento de Caldas, para los meses de enero de 2014 a marzo de 2018 y un IEMS mínimo de -2.35. La gráfica de la Figura 45 muestra el porcentaje de área con las clasificaciones del IEMS para el departamento del Chocó, en agregación de 24 meses; de la gráfica se deduce que la incidencia de los eventos se presentó en el departamento durante los años de 1985 a 1995, principalmente, y para los años siguientes a partir de 2015.

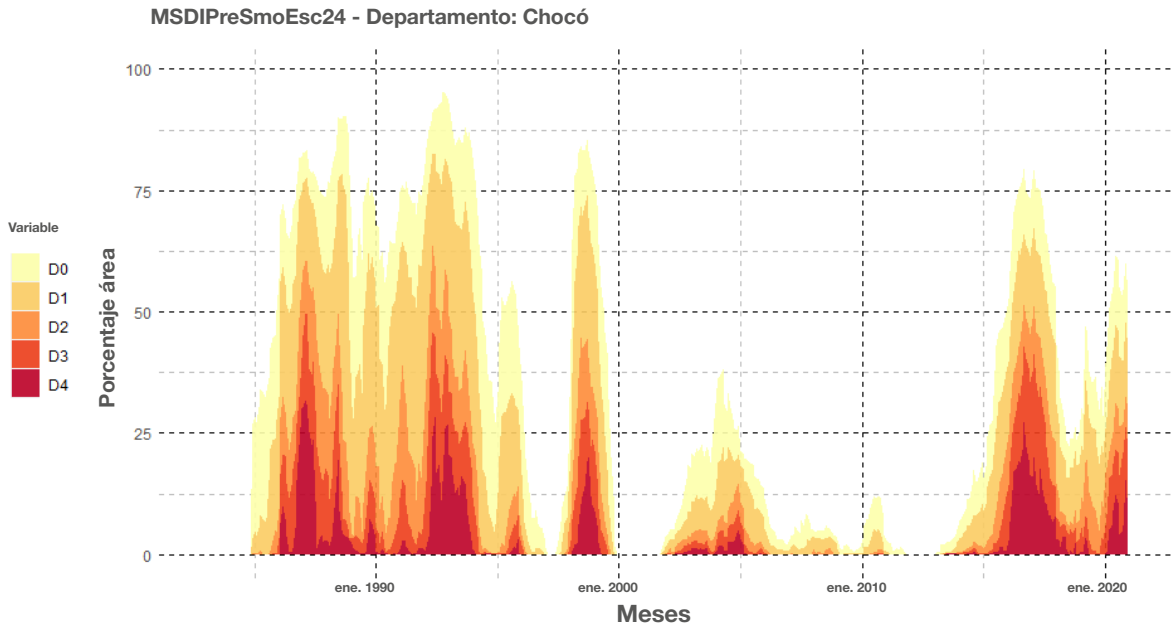



Figura 45. Extensión espacial índice multivariado precipitación humedad del suelo escorrentía en el departamento del Chocó.

En función del análisis del indicador multivariado de precipitación-humedad del suelo-escorrentía con agregación temporal de 24 meses, para el departamento del Chocó se puede evidenciar la forma como el evento identificado se extendió por el territorio, alcanzando incluso porcentajes en área del departamento en valores cercanos al 75 %. En este contexto, la Figura 46 presenta la evolución temporal de la serie correspondiente al IEMS para una agregación de 24 meses, resaltando en ella el periodo correspondiente a los años 1985 a 1995 donde se identificó un evento de sequía de particulares connotaciones en el territorio, en términos espaciales y de una fuerte intensidad.

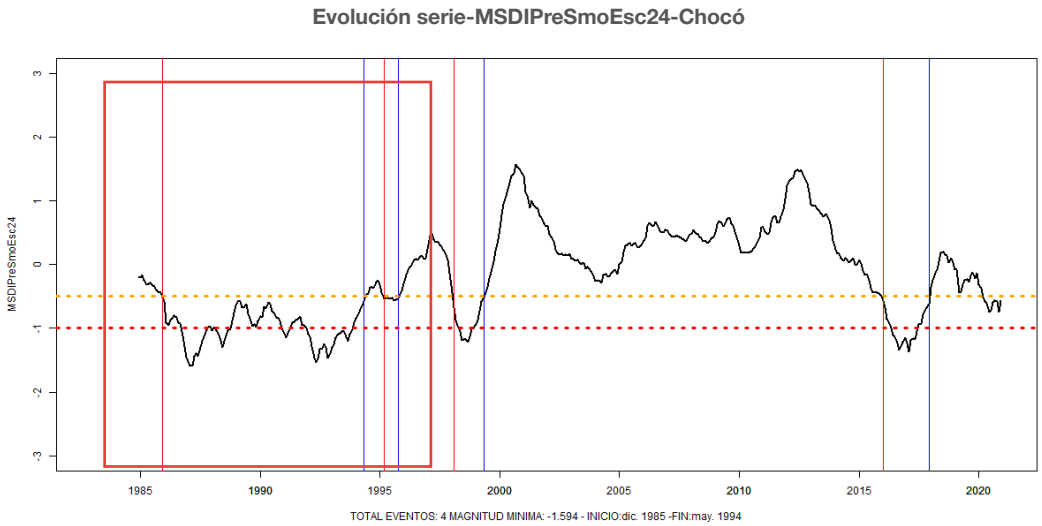



Figura 46. Serie temporal índice multivariado (IEMS) precipitación-humedad del suelo-escorrentía, agregación 24 meses, departamento del Chocó.

La serie temporal del índice multivariado para el departamento del Chocó, indicada en la Figura 46, permite identificar el momento en el cual se alcanza el valor del inicio del evento; de acuerdo con la metodología descrita, el mencionado umbral ha sido establecido como (-0.5) en donde inicia (según la clasificación) un evento «anormalmente seco»; luego, según con las condiciones, el evento se desarrolla y evoluciona en las diferentes categorías (Tabla 13). Para este evento en particular (resaltado en el rectángulo rojo), se alcanza un valor mínimo de 1.594, ubicado en el rango de «sequía severa», valor ocurrido en los meses de febrero y marzo de 1987. Las líneas en diferentes colores en la Figura 46 indican cada una de las diferentes clasificaciones de los eventos; de manera similar a lo descrito en la Figura 45, el alcance espacial del evento para los meses de febrero y marzo de 1987, fechas donde se alcanza la mayor extensión, se ilustra con la ayuda de la Figura 47.

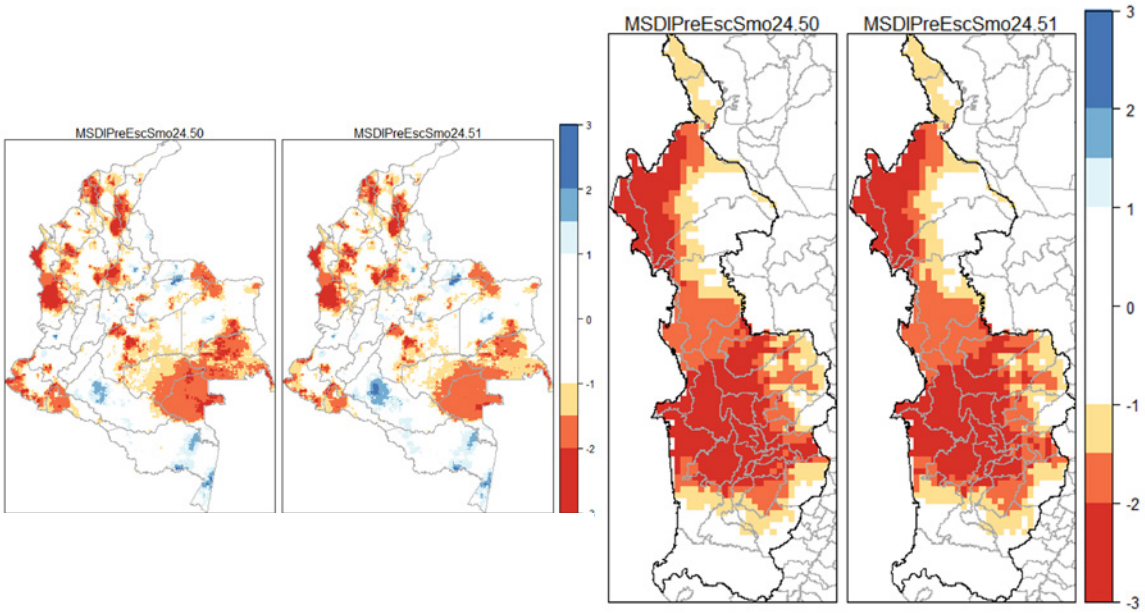



Figura 47. Espacialización índice multivariado precipitación-humedad del suelo-escorrentía, agregación 24 meses, meses de febrero y marzo de 1987, nivel nacional y departamento del Chocó.

La espacialización de los índices permite entender los procesos de extensión del evento en el territorio en análisis. En este caso (departamento del Chocó), se evidencia que para febrero y marzo de 1987 los índices alcanzaron sus valores más bajos. La incidencia del evento se encuentra sobre los municipios del centro y noroccidente del departamento. Para este mismo periodo, a escala nacional, se puede observar que el departamento con mayor extensión en valores críticos (valores menores de -0.5) se concentra en el Chocó; sin embargo, se ven algunas zonas de igual intensidad (tonos rojos) en áreas de los departamentos de Cesar, Bolívar, Meta y Antioquia.

La evolución de cada uno de los índices en el tiempo y en diferentes periodos de agregación permite entender el proceso de propagación del evento y conocer cuál componente del ciclo hidrológico (precipitación, escorrentía o humedad del suelo) tiene mayor implicación en la caracterización del evento. La Figura 48 muestra las evoluciones correspondientes a los índices calculados para el evento ocurrido en el departamento del Chocó entre diciembre de 1985 y mayo de 1994; se incluyen las evoluciones temporales de los índices univariados en diferentes agregaciones temporales, y la gráfica comparativa de los índices univariados y multivariados para agregaciones temporales de 24 meses, en el departamento del Chocó, en el lapso 1985-1994.

De la misma forma, los análisis permiten llegar a niveles municipales, en donde es claro que en la medida en que la resolución espacial de análisis es menor, el número de eventos identificados aumenta de forma considerable; en este caso, para los 1112 municipios que se incorporan en el estudio se han evidenciado 612.000 eventos, de los cuales 449.774 corresponden a los comprobados con el uso de índices univariados y los restantes con el apoyo de índices multivariados.

Los municipios con el menor número de eventos en el periodo de análisis corresponden a Pasca, en Cundinamarca, con 340 eventos; Restrepo, en el Meta, con 284; Susacón, con 340 eventos, y Tutazá, con 337, en el departamento de Boyacá; y el municipio de La Cumbre, en el Valle del Cauca, con 318. El mayor número de eventos de sequía evidenciados están en los municipios de Espinal, con 759 eventos, y Flandes, con 796, ambos en el Tolima; en La Primavera, Guaviare, con 756; en Paz de Ariporo en el Casanare, con 751, y en Puerto Carreño con 743.

Con respecto a la magnitud e intensidad de los eventos, el más crítico se encontró en el municipio de Machetá, en Cundinamarca, con una duración de 150 meses, que inició en julio de 1988 y culminó en diciembre de 2020, alcanzando un mínimo del índice multivariado de precipitación-humedad-escorrentía para una agregación de 24 meses de -2.603 (sequía excepcional), y una magnitud total (sumatoria índices mensuales) con un valor de -367.63.

Los resultados de los cálculos a nivel municipal se pueden consultar en el **Anexo 3b** digital del Estudio.

### 3.2.4 Índice multivariado integrado de sequías integrado (IMSI)

Con el propósito de hacer un análisis integral de los índices obtenidos y generar un índice que permita hacer comparaciones en la ventana temporal incluida en el estudio, se establece la creación de un índice de sequía; este incorpora el cálculo de los índices explicados e integra los valores de magnitud de los eventos y su duración en la ventana temporal de análisis para cada uno de los índices calculados y cada una de las agregaciones espaciales definidas.
En este contexto, el índice obtenido al final evidencia la intensidad, en promedio, de los eventos identificados con la aplicación de los índices tanto univariados como multivariados; permite establecer una métrica de comparación entre las diferentes unidades espaciales de análisis (departamentos, municipios, zonas y subzonas) a fin de establecer una comparación en el contexto nacional para cada nivel de agregación espacial y temporal que evidencie la ocurrencia de eventos con mayor recurrencia y con mayor intensidad.

Se utilizan las series generadas para cada uno de los índices y se calcula la relación entre la suma de las magnitudes de todos los eventos identificados en cada unidad espacial de análisis para cada agregación temporal y la duración total de estos.

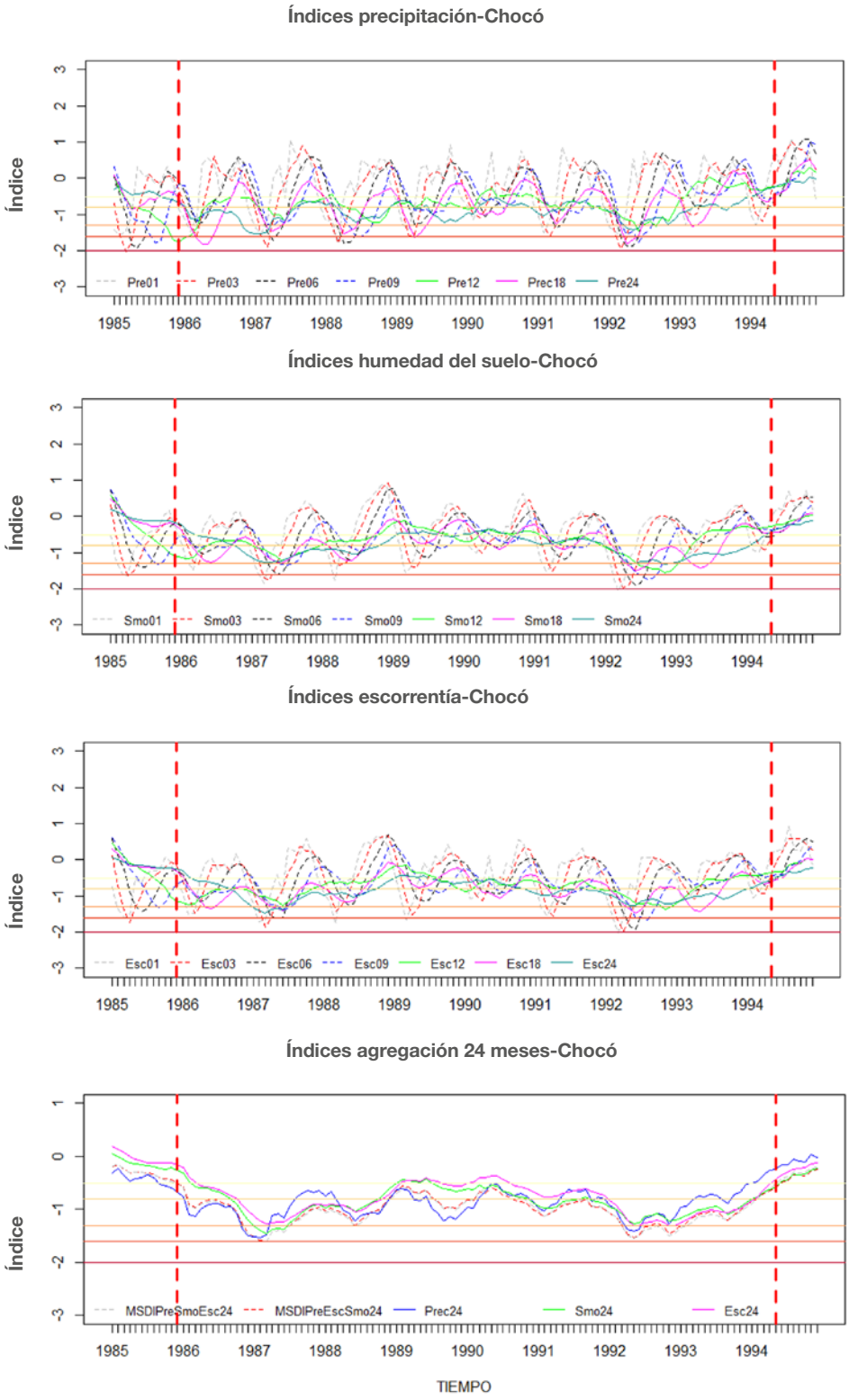



Figura 48. Series de índices multivariados y univariados para el departamento del Chocó, ventana temporal de 1984 a 1994.

Para cada uno de los departamentos y municipios, y de la zona y subzona hidrográfica, se obtienen los valores del IMSI. Los datos obtenidos se clasifican en «muy alto», «alto», «medio», «bajo» y «muy bajo». Los clasificados como muy altos representan la unidad geográfica de análisis donde se presentan eventos de mayor impacto y recurrencia, y se representan en tonos rojos, es decir, con valores negativos más bajos; por el contrario, áreas con menor número de eventos y duraciones contarán con valores mayores, los cuales se representan en tonos azules. La clasificación se logra a partir del conteo del total de eventos para cada índice y su correspondiente magnitud, de acuerdo con la definición establecida en este capítulo, para consolidar la información generada a partir de la metodología propuesta. Los colores usados para las clasificaciones a niveles de mapas y tablas se presentan en la Figura 49.




Figura 49. Clasificación índice multivariado integrado de sequías.

A nivel de zonas hidrográficas, de acuerdo con la Tabla 20, los índices integrados para todas las agregaciones evidencian comportamiento de los fenómenos de sequía en las zonas de Apure, Napo, Baudó y directos al Pacífico, lo que muestra que en estas zonas hidrográficas los eventos presentados han tenido duraciones y magnitudes importantes en comparación con los eventos presentados en las otras zonas hidrográficas. Por el contrario, en las zonas del Putumayo y del Patía se denota que los eventos presentan duraciones e intensidades menores, desde la óptica de todos los índices. De manera general, la columna incluida en la Tabla 20, correspondiente al índice multivariado MSDIPreEscSmo03, se encuentra espacializada en el mapa de la Figura 50; es notable la forma como la Orinoquía colombiana se encuentra en la clasificación de alto y muy alto, lo que evidencia una incidencia mayor de los eventos de sequía en esta región del país.

En cuanto a departamentos, los que muestran mayor incidencia son los de Atlántico, Quindío y Vaupés; en contraste, los departamentos de Amazonas y Nariño evidencian menores incidencias en eventos de sequía en su territorio. De manera similar a como se hizo con las zonas hidrográficas, se incluye la Figura 50 en donde se muestra en los niveles departamentales el comportamiento del índice integrado de sequías con el uso del índice multivariado y una agregación temporal de tres meses; en este sentido, se observa la incidencia de los eventos de sequía en los departamentos que corresponden al área de la Orinoquia. Finalmente, la Figura 51 refleja la columna MSDIPreEscSmo03, incluida en la Tabla 21.

Tabla 20. Índice integrado de sequías en zonas hidrográficas.

| Zona hidrográfica | Pre01 | Pre03 | Pre06 | Pre09 | Pre12 | Pre18 | Pre24 | Smo01 | Smo03 | Smo06 | Smo09 | Smo12 | Smo18 | Smo24 | Esc01 | Esc03 | Esc06 | Esc09 | Esc12 | Esc18 | Esc24 | MSDIPreEscSmo01 | MSDIPreEscSmo03 | MSDIPreEscSmo06 | MSDIPreEscSmo09 | MSDIPreEscSmo12 | MSDIPreEscSmo18 | MSDIPreEscSmo24 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Atrato - Darién | -1.747 | -1.830 | -1.767 | -1.794 | -1.720 | -1.825 | -1.770 | -1.865 | -1.852 | -1.880 | -1.776 | -1.855 | -1.853 | -1.738 | -1.858 | -1.848 | -1.803 | -1.693 | -1.683 | -1.721 | -1.688 | -2.028 | -2.043 | -1.948 | -1.972 | -1.894 | -1.992 | -1.970 |
| Caribe - litoral | -1.648 | -1.795 | -1.772 | -1.716 | -1.765 | -1.832 | -1.942 | -1.743 | -1.769 | -1.704 | -1.641 | -1.633 | -1.702 | -1.750 | -1.678 | -1.671 | -1.651 | -1.602 | -1.575 | -1.604 | -1.692 | -1.934 | -1.985 | -1.958 | -1.795 | -1.773 | -1.846 | -1.846 |
| Sinú | -1.683 | -1.786 | -1.794 | -1.610 | -1.699 | -1.784 | -1.603 | -1.725 | -1.713 | -1.685 | -1.538 | -1.598 | -1.620 | -1.568 | -1.705 | -1.675 | -1.585 | -1.470 | -1.537 | -1.604 | -1.588 | -1.961 | -2.010 | -1.992 | -1.821 | -1.922 | -1.866 | -1.857 |
| Caribe - Guajira | -1.285 | -1.626 | -1.699 | -1.726 | -1.958 | -1.924 | -1.879 | -1.505 | -1.682 | -1.792 | -1.820 | -1.809 | -1.849 | -1.835 | -1.547 | -1.707 | -1.791 | -1.832 | -1.823 | -1.855 | -1.854 | -1.657 | -1.849 | -1.941 | -1.881 | -2.031 | -1.945 | -1.969 |
| Catatumbo | -1.529 | -1.639 | -1.799 | -1.701 | -1.898 | -1.901 | -1.932 | -1.733 | -1.781 | -1.880 | -1.829 | -1.908 | -2.001 | -2.104 | -1.692 | -1.778 | -1.802 | -1.845 | -1.917 | -2.048 | -2.127 | -1.860 | -1.959 | -2.012 | -1.951 | -2.048 | -2.066 | -2.041 |
| Alto Magdalena | -1.351 | -1.453 | -1.835 | -1.752 | -2.099 | -1.925 | -2.039 | -1.525 | -1.678 | -1.892 | -1.930 | -1.952 | -1.864 | -1.860 | -1.540 | -1.645 | -1.839 | -1.829 | -1.966 | -1.792 | -1.798 | -1.613 | -1.761 | -1.910 | -1.968 | -2.068 | -1.980 | -2.051 |
| Saldaña | -1.567 | -1.641 | -1.943 | -1.834 | -2.066 | -2.008 | -2.036 | -1.775 | -1.811 | -1.942 | -1.968 | -2.009 | -2.042 | -2.058 | -1.759 | -1.855 | -1.915 | -1.979 | -1.957 | -1.940 | -2.049 | -1.851 | -1.899 | -2.014 | -1.983 | -2.047 | -2.117 | -2.205 |
| Medio Magdalena | -1.526 | -1.651 | -1.624 | -1.581 | -1.745 | -1.809 | -1.806 | -1.578 | -1.553 | -1.624 | -1.714 | -1.847 | -1.740 | -1.756 | -1.437 | -1.533 | -1.582 | -1.701 | -1.803 | -1.711 | -1.745 | -1.715 | -1.747 | -1.873 | -1.882 | -1.964 | -1.943 | -1.989 |
| Sogamoso | -1.524 | -1.628 | -1.716 | -1.584 | -1.770 | -1.739 | -1.773 | -1.529 | -1.619 | -1.861 | -1.868 | -1.957 | -1.952 | -1.924 | -1.527 | -1.606 | -1.872 | -1.898 | -1.881 | -1.932 | -1.927 | -1.721 | -1.767 | -1.967 | -1.965 | -2.021 | -2.075 | -2.147 |
| Bajo Magdalena - Cauca- San Jorge | -1.694 | -1.800 | -1.792 | -1.737 | -2.019 | -1.919 | -1.808 | -1.709 | -1.737 | -1.821 | -1.776 | -1.953 | -1.906 | -1.998 | -1.657 | -1.681 | -1.748 | -1.799 | -1.899 | -1.858 | -1.967 | -1.958 | -2.007 | -2.001 | -1.998 | -2.119 | -2.071 | -2.113 |
| Cauca | -1.303 | -1.390 | -1.579 | -1.598 | -1.723 | -1.774 | -1.845 | -1.577 | -1.580 | -1.737 | -1.781 | -1.878 | -1.941 | -1.959 | -1.468 | -1.571 | -1.711 | -1.777 | -1.879 | -1.918 | -1.984 | -1.648 | -1.642 | -1.899 | -1.867 | -1.941 | -1.950 | -2.065 |
| Nechí | -1.749 | -1.806 | -1.802 | -1.766 | -1.896 | -1.693 | -1.951 | -1.753 | -1.756 | -1.856 | -1.697 | -2.065 | -1.983 | -1.437 | -1.728 | -1.731 | -1.816 | -1.774 | -1.679 | -2.048 | -1.557 | -1.922 | -1.934 | -1.971 | -1.817 | -1.724 | -1.945 | -1.547 |
| Cesar | -1.661 | -1.812 | -1.799 | -1.737 | -1.873 | -1.844 | -1.979 | -1.680 | -1.681 | -1.813 | -1.851 | -1.992 | -1.925 | -1.901 | -1.559 | -1.614 | -1.775 | -1.815 | -2.007 | -1.823 | -1.905 | -1.837 | -1.969 | -2.056 | -2.088 | -2.063 | -2.054 | -2.092 |
| Bajo Magdalena | -1.650 | -1.780 | -1.751 | -1.800 | -1.921 | -1.891 | -1.996 | -1.676 | -1.733 | -1.771 | -1.852 | -1.918 | -1.904 | -1.921 | -1.593 | -1.681 | -1.708 | -1.805 | -1.887 | -1.853 | -1.975 | -1.851 | -1.949 | -1.969 | -2.012 | -2.123 | -2.063 | -2.021 |
| Inírida | -1.660 | -1.765 | -1.794 | -1.774 | -2.170 | -1.794 | -2.119 | -1.770 | -1.773 | -1.780 | -1.873 | -2.228 | -1.966 | -2.115 | -1.749 | -1.786 | -1.724 | -1.802 | -1.953 | -1.873 | -2.200 | -1.994 | -2.023 | -1.994 | -1.944 | -2.330 | -2.071 | -2.458 |
| Guaviare | -1.681 | -1.776 | -1.707 | -1.679 | -1.883 | -1.686 | -1.828 | -1.713 | -1.700 | -1.686 | -1.711 | -1.944 | -1.682 | -1.854 | -1.668 | -1.681 | -1.582 | -1.573 | -1.679 | -1.620 | -1.515 | -1.999 | -2.011 | -1.947 | -1.825 | -2.027 | -1.853 | -1.964 |
| Vichada | -1.712 | -1.810 | -1.777 | -1.710 | -1.863 | -1.775 | -1.870 | -1.776 | -1.772 | -1.733 | -1.709 | -1.720 | -1.654 | -1.712 | -1.748 | -1.742 | -1.656 | -1.605 | -1.858 | -1.662 | -1.744 | -2.070 | -2.064 | -1.976 | -1.885 | -1.956 | -1.890 | -1.847 |
| Tomo | -1.705 | -1.826 | -1.794 | -1.761 | -1.688 | -1.769 | -1.678 | -1.777 | -1.807 | -1.827 | -1.796 | -1.684 | -1.740 | -1.563 | -1.776 | -1.791 | -1.789 | -1.659 | -1.469 | -1.654 | -1.471 | -2.077 | -2.082 | -2.030 | -1.867 | -1.775 | -1.874 | -1.726 |
| Meta | -1.700 | -1.818 | -1.740 | -1.603 | -1.543 | -1.654 | -1.606 | -1.690 | -1.679 | -1.653 | -1.544 | -1.405 | -1.494 | -1.230 | -1.680 | -1.658 | -1.575 | -1.349 | -1.304 | -1.391 | -1.253 | -1.987 | -2.018 | -1.909 | -1.755 | -1.719 | -1.777 | -1.609 |
| Casanare | -1.673 | -1.819 | -1.790 | -1.722 | -1.859 | -1.758 | -1.829 | -1.746 | -1.722 | -1.717 | -1.664 | -1.805 | -1.670 | -1.618 | -1.740 | -1.712 | -1.619 | -1.581 | -1.787 | -1.602 | -1.537 | -2.082 | -2.110 | -2.022 | -1.808 | -1.986 | -1.872 | -1.769 |
| Arauca | -1.613 | -1.743 | -1.749 | -1.807 | -1.948 | -1.889 | -2.083 | -1.681 | -1.678 | -1.634 | -1.586 | -1.588 | -1.537 | -1.469 | -1.588 | -1.605 | -1.573 | -1.500 | -1.549 | -1.504 | -1.550 | -1.949 | -1.952 | -1.919 | -1.892 | -1.954 | -1.878 | -1.717 |
| Orinoco directos | -1.651 | -1.797 | -1.761 | -1.752 | -1.588 | -1.668 | -1.544 | -1.759 | -1.761 | -1.729 | -1.585 | -1.562 | -1.495 | -1.466 | -1.690 | -1.710 | -1.647 | -1.415 | -1.402 | -1.482 | -1.418 | -2.086 | -2.075 | -2.036 | -1.814 | -1.738 | -1.802 | -1.512 |
| Apure | -1.749 | -1.821 | -1.875 | -1.979 | -2.227 | -2.062 | -1.360 | -1.918 | -1.959 | -1.994 | -2.011 | -2.143 | -2.060 | -2.148 | -1.793 | -1.875 | -1.906 | -2.051 | -2.175 | -2.038 | -2.299 | -2.045 | -2.087 | -2.150 | -2.212 | -2.352 | -2.161 | -2.145 |
| Guainía | -1.683 | -1.810 | -1.812 | -1.887 | -2.086 | -1.921 | -2.173 | -1.897 | -1.833 | -1.963 | -2.005 | -2.267 | -2.064 | -2.240 | -1.878 | -1.836 | -1.824 | -2.008 | -2.045 | -2.043 | -2.247 | -2.018 | -2.032 | -2.050 | -2.075 | -2.361 | -2.096 | -2.262 |
| Vaupés | -1.635 | -1.796 | -1.845 | -1.880 | -2.132 | -1.951 | -2.073 | -1.796 | -1.785 | -1.811 | -1.927 | -2.001 | -1.962 | -2.079 | -1.696 | -1.734 | -1.737 | -1.820 | -2.041 | -2.001 | -2.024 | -1.893 | -1.987 | -1.979 | -1.980 | -2.194 | -2.075 | -2.100 |
| Apaporis | -1.488 | -1.647 | -1.757 | -1.711 | -1.953 | -1.732 | -1.461 | -1.789 | -1.757 | -1.810 | -1.954 | -2.046 | -1.890 | -1.662 | -1.650 | -1.707 | -1.759 | -1.904 | -1.898 | -1.791 | -1.448 | -1.880 | -1.932 | -1.929 | -1.942 | -2.134 | -2.004 | -1.727 |
| Caquetá | -1.241 | -1.538 | -1.646 | -1.695 | -1.845 | -1.676 | -1.875 | -1.525 | -1.522 | -1.545 | -1.559 | -1.578 | -1.592 | -1.199 | -1.424 | -1.499 | -1.477 | -1.498 | -1.529 | -1.538 | -1.227 | -1.711 | -1.721 | -1.795 | -1.748 | -1.800 | -1.848 | -1.399 |
| Yari | -1.646 | -1.771 | -1.821 | -1.866 | -2.134 | -1.914 | -1.500 | -1.799 | -1.808 | -1.892 | -1.825 | -2.080 | -1.945 | -2.048 | -1.717 | -1.772 | -1.812 | -1.831 | -2.067 | -1.895 | -2.065 | -1.986 | -2.042 | -2.014 | -2.109 | -2.257 | -2.052 | -1.576 |
| Caguán | -1.565 | -1.772 | -1.736 | -1.767 | -1.854 | -1.859 | -1.091 | -1.593 | -1.631 | -1.673 | -1.768 | -1.121 | -1.076 | -1.194 | -1.547 | -1.614 | -1.680 | -1.803 | -1.076 | -1.100 | -1.093 | -1.868 | -1.926 | -1.847 | -1.895 | -1.194 | -1.314 | -1.123 |
| Putumayo | -1.207 | -1.513 | -1.566 | -1.470 | -1.527 | -1.489 | -1.532 | -1.424 | -1.430 | -1.444 | -1.514 | -1.443 | -1.356 | -1.582 | -1.398 | -1.413 | -1.407 | -1.440 | -1.453 | -1.409 | -1.598 | -1.625 | -1.653 | -1.632 | -1.683 | -1.589 | -1.574 | -1.593 |
| Amazonas directos | -1.691 | -1.800 | -1.876 | -1.930 | -2.060 | -1.994 | -2.117 | -1.848 | -1.873 | -1.916 | -1.979 | -2.024 | -2.104 | -2.079 | -1.796 | -1.954 | -1.965 | -2.053 | -2.115 | -2.102 | -2.154 | -2.062 | -2.101 | -2.112 | -2.138 | -2.290 | -2.230 | -2.217 |
| Napo | -1.547 | -1.862 | -2.020 | -2.147 | -2.078 | -2.174 | -2.146 | -1.996 | -2.002 | -2.029 | -2.083 | -2.158 | -2.004 | -2.047 | -1.987 | -2.004 | -2.037 | -2.062 | -2.161 | -2.089 | -2.185 | -2.059 | -2.145 | -2.152 | -2.198 | -2.160 | -2.179 | -2.355 |
| Mira | -1.449 | -1.779 | -1.863 | -1.835 | -1.868 | -1.905 | -1.833 | -1.710 | -1.706 | -1.768 | -1.709 | -1.760 | -1.741 | -1.601 | -1.661 | -1.751 | -1.718 | -1.762 | -1.735 | -1.744 | -1.756 | -1.776 | -1.934 | -1.878 | -1.894 | -2.000 | -1.980 | -1.854 |
| Patía | -1.506 | -1.605 | -1.630 | -1.554 | -1.717 | -1.686 | -1.658 | -1.519 | -1.557 | -1.551 | -1.549 | -1.608 | -1.552 | -1.586 | -1.409 | -1.424 | -1.521 | -1.481 | -1.587 | -1.466 | -1.474 | -1.698 | -1.801 | -1.798 | -1.762 | -1.841 | -1.752 | -1.770 |
| Tapaje-Dagua-directos | -1.476 | -1.724 | -1.938 | -1.984 | -1.992 | -2.029 | -2.111 | -1.599 | -1.705 | -1.798 | -1.274 | -1.111 | -0.913 | -0.983 | -1.565 | -1.614 | -1.741 | -1.004 | -0.973 | -0.979 | -1.051 | -1.692 | -1.821 | -1.642 | -1.688 | -1.608 | -1.552 | -1.805 |
| San Juan | -1.436 | -1.597 | -1.633 | -1.540 | -1.500 | -1.464 | -1.452 | -1.735 | -1.783 | -1.828 | -1.897 | -1.972 | -1.979 | -2.096 | -1.671 | -1.770 | -1.814 | -1.869 | -2.090 | -2.017 | -2.001 | -1.790 | -1.833 | -1.912 | -1.883 | -1.740 | -1.679 | -1.618 |
| Baudó-directos-Pacífico | -1.696 | -1.814 | -1.862 | -2.008 | -2.071 | -2.020 | -2.157 | -1.796 | -1.840 | -1.872 | -2.007 | -1.991 | -1.966 | -2.008 | -1.777 | -1.792 | -1.887 | -1.935 | -2.009 | -1.993 | -2.169 | -1.993 | -2.047 | -2.034 | -2.127 | -2.197 | -2.154 | -2.194 |
| Pacífico directos | -1.743 | -1.821 | -1.873 | -1.913 | -2.084 | -1.959 | -2.142 | -1.811 | -1.886 | -1.888 | -2.022 | -2.056 | -2.070 | -2.120 | -1.763 | -1.850 | -1.830 | -1.966 | -2.076 | -2.069 | -2.112 | -1.991 | -2.045 | -2.049 | -2.150 | -2.181 | -2.201 | -2.294 |

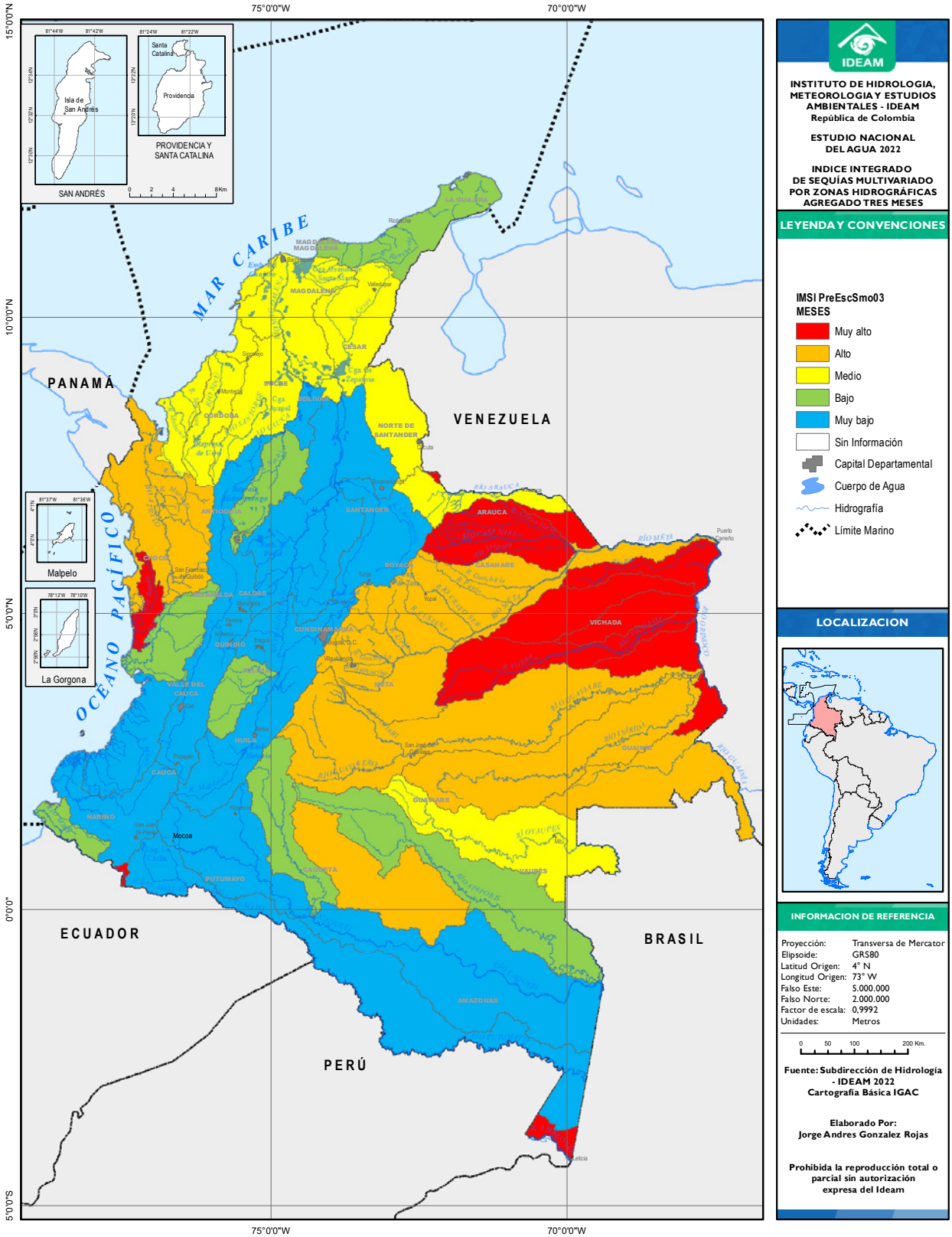



Figura 50. Índice integrado de sequías multivariado por zonas hidrográficas, agregación tres meses.

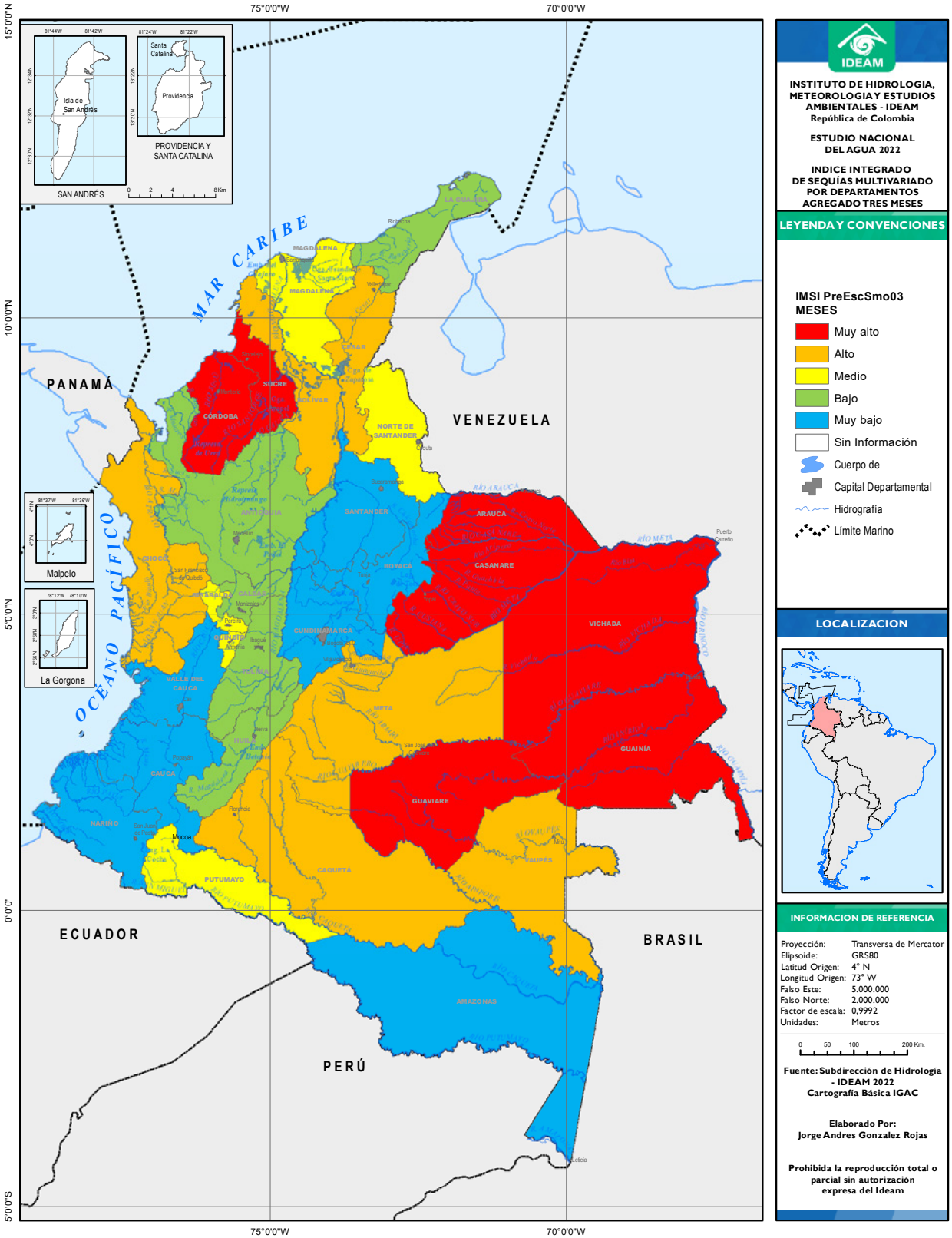



Figura 51. Índice integrado multivariado de sequías por departamentos, agregación tres meses.

Tabla 21. Índice integrado de sequías por departamentos.

| Departamento | Pre01 | Pre03 | Pre06 | Pre09 | Pre12 | Pre18 | Pre24 | Smo01 | Smo03 | Smo06 | Smo09 | Smo12 | Smo18 | Smo24 | Esc01 | Esc03 | Esc06 | Esc09 | Esc12 | Esc18 | Esc24 | MSDIPreEscSmo01 | MSDIPreEscSmo03 | MSDIPreEscSmo06 | MSDIPreEscSmo09 | MSDIPreEscSmo12 | MSDIPreEscSmo18 | MSDIPreEscSmo24 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Amazonas | -1.230 | -1.512 | -1.605 | -1.740 | -1.771 | -1.657 | -1.894 | -1.543 | -1.545 | -1.592 | -1.541 | -1.602 | -1.498 | -1.221 | -1.398 | -1.470 | -1.583 | -1.525 | -1.597 | -1.507 | -1.174 | -1.696 | -1.749 | -1.718 | -1.798 | -1.739 | -1.737 | -1.398 |
| Antioquia | -1.674 | -1.761 | -1.736 | -1.699 | -1.799 | -1.791 | -1.779 | -1.684 | -1.695 | -1.733 | -1.654 | -1.758 | -1.757 | -1.684 | -1.655 | -1.640 | -1.680 | -1.587 | -1.734 | -1.678 | -1.622 | -1.847 | -1.852 | -1.842 | -1.870 | -1.941 | -1.876 | -1.864 |
| Arauca | -1.642 | -1.819 | -1.791 | -1.747 | -1.671 | -1.694 | -1.619 | -1.733 | -1.751 | -1.691 | -1.645 | -1.638 | -1.515 | -1.565 | -1.725 | -1.707 | -1.633 | -1.605 | -1.550 | -1.515 | -1.519 | -2.058 | -2.117 | -2.013 | -1.834 | -1.784 | -1.825 | -1.797 |
| Atlántico | -1.580 | -1.787 | -1.793 | -1.922 | -2.068 | -1.987 | -2.045 | -1.792 | -1.827 | -1.884 | -1.974 | -2.037 | -1.998 | -2.004 | -1.670 | -1.723 | -1.839 | -1.904 | -1.994 | -1.990 | -1.988 | -1.889 | -1.949 | -2.057 | -2.092 | -2.188 | -2.101 | -2.058 |
| Bolívar | -1.706 | -1.788 | -1.773 | -1.735 | -1.917 | -1.872 | -1.885 | -1.665 | -1.706 | -1.733 | -1.814 | -1.982 | -1.861 | -1.848 | -1.636 | -1.687 | -1.671 | -1.808 | -1.816 | -1.795 | -1.869 | -1.907 | -1.984 | -1.937 | -1.960 | -1.997 | -1.994 | -2.034 |
| Boyacá | -1.607 | -1.708 | -1.648 | -1.547 | -1.730 | -1.699 | -1.796 | -1.501 | -1.529 | -1.658 | -1.772 | -1.768 | -1.794 | -2.008 | -1.371 | -1.398 | -1.633 | -1.697 | -1.740 | -1.777 | -2.004 | -1.757 | -1.764 | -1.794 | -1.868 | -1.976 | -1.951 | -1.930 |
| Caldas | -1.412 | -1.565 | -1.914 | -1.818 | -2.063 | -2.105 | -2.136 | -1.720 | -1.717 | -1.878 | -1.999 | -1.991 | -2.063 | -1.974 | -1.643 | -1.795 | -1.947 | -2.007 | -2.008 | -1.999 | -2.028 | -1.786 | -1.874 | -2.059 | -2.138 | -2.141 | -2.205 | -2.259 |
| Caquetá | -1.608 | -1.754 | -1.722 | -1.782 | -1.893 | -1.763 | -1.332 | -1.708 | -1.723 | -1.731 | -1.612 | -1.832 | -1.762 | -1.248 | -1.669 | -1.700 | -1.698 | -1.649 | -1.790 | -1.700 | -1.126 | -1.942 | -1.969 | -1.895 | -1.927 | -1.992 | -1.873 | -1.397 |
| Casanare | -1.689 | -1.823 | -1.765 | -1.652 | -1.790 | -1.723 | -1.808 | -1.738 | -1.729 | -1.696 | -1.585 | -1.484 | -1.597 | -1.480 | -1.725 | -1.720 | -1.672 | -1.510 | -1.587 | -1.561 | -1.538 | -2.045 | -2.104 | -2.015 | -1.834 | -1.854 | -1.866 | -1.808 |
| Cauca | -1.204 | -1.329 | -1.400 | -1.422 | -1.524 | -1.414 | -1.466 | -1.527 | -1.582 | -1.720 | -1.766 | -1.756 | -1.749 | -1.845 | -1.447 | -1.518 | -1.634 | -1.628 | -1.713 | -1.626 | -1.735 | -1.649 | -1.740 | -1.820 | -1.791 | -1.833 | -1.787 | -1.635 |
| Cesar | -1.673 | -1.816 | -1.826 | -1.768 | -1.864 | -1.903 | -1.816 | -1.679 | -1.754 | -1.834 | -1.884 | -1.978 | -1.923 | -1.997 | -1.581 | -1.641 | -1.811 | -1.829 | -1.989 | -1.866 | -2.021 | -1.856 | -1.970 | -2.051 | -2.070 | -2.083 | -2.071 | -2.058 |
| Chocó | -1.735 | -1.791 | -1.769 | -1.788 | -1.749 | -1.779 | -1.699 | -1.739 | -1.798 | -1.730 | -1.778 | -1.893 | -1.860 | -1.795 | -1.715 | -1.762 | -1.711 | -1.755 | -1.772 | -1.790 | -1.749 | -1.952 | -1.975 | -1.926 | -1.911 | -1.914 | -1.974 | -1.982 |
| Córdoba | -1.693 | -1.791 | -1.798 | -1.706 | -1.684 | -1.806 | -1.675 | -1.725 | -1.736 | -1.712 | -1.635 | -1.767 | -1.747 | -1.792 | -1.683 | -1.686 | -1.597 | -1.554 | -1.746 | -1.708 | -1.758 | -1.989 | -2.037 | -2.003 | -1.896 | -1.980 | -1.934 | -1.977 |
| Cundinamarca | -1.266 | -1.323 | -1.651 | -1.587 | -1.941 | -1.822 | -1.901 | -1.463 | -1.545 | -1.713 | -1.674 | -1.796 | -1.676 | -1.640 | -1.309 | -1.469 | -1.640 | -1.672 | -1.751 | -1.621 | -1.574 | -1.626 | -1.612 | -1.856 | -1.838 | -2.006 | -1.930 | -1.885 |
| Guainía | -1.691 | -1.828 | -1.805 | -1.806 | -2.020 | -1.790 | -2.122 | -1.859 | -1.851 | -1.883 | -1.898 | -2.126 | -1.901 | -2.179 | -1.809 | -1.830 | -1.809 | -1.864 | -1.910 | -1.810 | -2.090 | -2.001 | -2.050 | -2.031 | -2.027 | -2.145 | -2.064 | -2.294 |
| Guaviare | -1.687 | -1.807 | -1.785 | -1.784 | -1.921 | -1.807 | -1.909 | -1.772 | -1.763 | -1.726 | -1.878 | -2.051 | -1.883 | -2.036 | -1.710 | -1.787 | -1.737 | -1.809 | -1.855 | -1.826 | -1.862 | -2.006 | -2.032 | -1.954 | -1.968 | -2.118 | -1.935 | -2.122 |
| Huila | -1.361 | -1.478 | -1.763 | -1.841 | -2.078 | -2.016 | -2.150 | -1.658 | -1.793 | -2.053 | -2.074 | -2.021 | -1.926 | -1.956 | -1.650 | -1.760 | -1.939 | -1.981 | -2.038 | -1.909 | -1.894 | -1.676 | -1.816 | -2.076 | -2.048 | -2.072 | -2.018 | -2.092 |
| La Guajira | -1.272 | -1.617 | -1.706 | -1.707 | -2.007 | -1.937 | -1.874 | -1.528 | -1.649 | -1.820 | -1.835 | -1.719 | -1.818 | -1.903 | -1.575 | -1.693 | -1.838 | -1.849 | -1.806 | -1.851 | -1.857 | -1.681 | -1.872 | -1.962 | -1.900 | -2.002 | -1.965 | -2.021 |
| Magdalena | -1.622 | -1.772 | -1.750 | -1.850 | -1.990 | -1.912 | -1.912 | -1.705 | -1.719 | -1.791 | -1.861 | -1.960 | -1.907 | -1.926 | -1.624 | -1.686 | -1.710 | -1.785 | -1.913 | -1.865 | -1.905 | -1.851 | -1.954 | -1.967 | -2.015 | -2.097 | -2.002 | -1.930 |
| Meta | -1.697 | -1.795 | -1.681 | -1.666 | -1.636 | -1.630 | -1.695 | -1.700 | -1.682 | -1.646 | -1.581 | -1.596 | -1.452 | -1.637 | -1.651 | -1.619 | -1.521 | -1.428 | -1.529 | -1.418 | -1.435 | -1.981 | -1.983 | -1.876 | -1.782 | -1.769 | -1.681 | -1.644 |
| Nariño | -1.341 | -1.412 | -1.441 | -1.520 | -1.714 | -1.561 | -1.547 | -1.289 | -1.332 | -1.378 | -1.365 | -1.439 | -1.325 | -1.316 | -1.172 | -1.253 | -1.270 | -1.269 | -1.412 | -1.333 | -1.316 | -1.553 | -1.596 | -1.729 | -1.744 | -1.777 | -1.678 | -1.721 |
| Norte Santander | -1.540 | -1.659 | -1.768 | -1.677 | -1.872 | -1.896 | -2.001 | -1.712 | -1.719 | -1.871 | -1.782 | -1.918 | -2.030 | -2.096 | -1.685 | -1.740 | -1.787 | -1.784 | -1.920 | -2.035 | -2.150 | -1.866 | -1.918 | -1.973 | -1.927 | -2.073 | -2.069 | -2.081 |
| Putumayo | -1.552 | -1.776 | -1.831 | -1.762 | -1.904 | -1.859 | -1.936 | -1.729 | -1.672 | -1.666 | -1.761 | -2.049 | -1.796 | -1.848 |  | -1.645 | -1.643 | -1.722 | -1.820 | -1.800 | -1.763 | -1.854 | -1.934 | -1.886 | -1.886 | -2.103 | -1.935 | -2.011 |
| Quindío | -1.440 | -1.568 | -1.916 | -1.827 | -2.068 | -1.990 | -2.223 | -1.757 | -1.847 | -1.984 | -2.029 | -2.063 | -2.224 | -2.222 | -1.645 | -1.759 | -1.965 | -2.062 | -2.120 | -2.167 | -2.175 | -1.837 | -1.918 | -2.045 | -2.044 | -2.156 | -2.267 | -2.371 |
| Risaralda | -1.386 | -1.550 | -1.891 | -1.699 | -1.853 | -1.956 | -1.982 | -1.780 | -1.873 | -1.915 | -1.955 | -1.978 | -2.000 | -2.014 | -1.731 | -1.796 | -1.905 | -1.956 | -1.950 | -1.980 | -1.984 | -1.825 | -1.875 | -2.108 | -2.071 | -2.045 | -2.118 | -2.097 |
| Santander | -1.558 | -1.718 | -1.738 | -1.558 | -1.826 | -1.725 | -1.804 | -1.604 | -1.609 | -1.691 | -1.786 | -1.853 | -1.836 | -1.810 | -1.575 | -1.596 | -1.705 | -1.708 | -1.891 | -1.834 | -1.844 | -1.730 | -1.747 | -1.887 | -1.830 | -2.011 | -1.933 | -1.946 |
| Sucre | -1.676 | -1.802 | -1.810 | -1.841 | -2.155 | -1.945 | -2.115 | -1.756 | -1.801 | -1.839 | -1.893 | -2.093 | -1.943 | -2.079 | -1.736 | -1.803 | -1.811 | -1.875 | -2.057 | -1.899 | -2.060 | -1.917 | -1.995 | -2.016 | -2.030 | -2.303 | -2.091 | -2.199 |
| Tolima | -1.454 | -1.597 | -1.813 | -1.826 | -1.982 | -1.914 | -1.962 | -1.617 | -1.678 | -1.818 | -1.871 | -1.914 | -1.855 | -1.904 | -1.622 | -1.674 | -1.791 | -1.836 | -1.824 | -1.760 | -1.895 | -1.728 | -1.854 | -1.970 | -1.943 | -1.950 | -2.017 | -2.082 |
| Valle del Cauca | -1.207 | -1.316 | -1.601 | -1.490 | -1.739 | -1.540 | -1.652 | -1.621 | -1.614 | -1.817 | -1.911 | -1.970 | -2.021 | -2.125 | -1.520 | -1.552 | -1.931 | -1.864 | -1.972 | -1.976 | -2.092 | -1.728 | -1.743 | -1.882 | -1.925 | -1.980 | -2.037 | -2.095 |
| Vaupés | -1.615 | -1.746 | -1.833 | -1.888 | -2.147 | -1.957 | -2.165 | -1.849 | -1.809 | -1.832 | -1.935 | -2.138 | -2.019 | -2.143 | -1.831 | -1.761 | -1.765 | -1.893 | -2.007 | -2.002 | -2.191 | -1.920 | -1.961 | -1.979 | -1.984 | -2.215 | -2.068 | -2.442 |
| Vichada | -1.702 | -1.804 | -1.761 | -1.704 | -1.758 | -1.724 | -1.787 | -1.761 | -1.760 | -1.737 | -1.642 | -1.600 | -1.639 | -1.397 | -1.696 | -1.710 | -1.632 | -1.483 | -1.332 | -1.437 | -1.353 | -2.057 | -2.068 | -2.013 | -1.818 | -1.754 | -1.800 | -1.620 |

### 3.2.5 Consideraciones y recomendaciones sobre eventos de sequía en Colombia

El uso de índices multivariados para hacer seguimiento a los eventos de sequía permite evaluar su impacto en los diferentes componentes del ciclo hidrológico, incorporando un análisis de la propagación de los eventos en cada uno de ellos; así mismo, el uso de diferentes agregaciones temporales hace posible evidenciar la forma como cada uno de los componentes mencionados se ve alterado como consecuencia del déficit de precipitación.

Los fenómenos de sequía afectan la oferta normal del recurso en el territorio; de tal forma, metodologías como la establecida posibilitan entender sus alcances en términos espaciales y comprender cómo, en cada una de las unidades de análisis, los eventos se desarrollan y se extienden, brindando a los tomadores de decisiones capacidades de enfoque en las áreas que puedan sufrir afectaciones importantes en el normal desarrollo de sus actividades ante la ocurrencia de un evento de similares características a los evidenciados con el análisis de las series históricas generadas.

Una vez establecida esta metodología, es importante indicar que, por su sencillez en el cálculo, es factible su incorporación operativa en plataformas que permitan la visualización de los índices como apoyo en el seguimiento oportuno a estos eventos. Para ello, es importante establecer la operatividad de los insumos asociados con los cálculos, es decir, los parámetros de escorrentía y humedad del suelo, principalmente.

## 3.3 Dinámica de las inundaciones y características de cuerpos de agua lénticos

En este capítulo, se muestran los aportes al conocimiento sobre la dinámica de las inundaciones y las características de los cuerpos de agua. El análisis de la dinámica de inundaciones para el territorio colombiano ha sido liderado por el Ideam con la incorporación sistemática de diferentes productos de sensores remotos que han soportado la evaluación de las áreas afectadas por estos procesos.

En esta evaluación, además se integra información correspondiente a ecosistemas acuáticos y coberturas asociadas, empleando para el efecto no solo las fuentes de datos nacionales sino también los productos de acceso global. También se presenta una síntesis de los resultados obtenidos sobre caracterización de cuerpos de agua lénticos en desarrollo de proyectos específicos durante el periodo comprendido entre los años 2018 y 2021.

Se establecen tres niveles de análisis como referencia: el primero, a escala nacional, con la actualización de las zonas potencialmente inundables; el segundo, a escala regional, con información sobre extensión de eventos de inundación asociados con la ocurrencia de eventos de La Niña; y el tercero, de escala local, que se enfoca en los resultados de la caracterización de amenaza de inundaciones en centros poblados.

Con respecto a los cuerpos de agua lénticos, se muestra el inventario de estos sistemas para las unidades de análisis seleccionadas (zonas y subzonas hidrográficas) y se detallan los resultados de la caracterización realizada en algunos de estos cuerpos de agua a nivel local.

### 3.3.1 Dinámica de las inundaciones

A nivel global, la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2021), a través de su *Atlas sobre mortalidad y pérdidas económicas debidas a fenómenos meteorológicos, climáticos e hidrológicos extremos (1970–2019)*, ha indicado que «(…) los impactos de los peligros relacionados con el tiempo, el clima y el agua siguen afectando negativamente a la salud y al desarrollo económico y social en todo el mundo». Esta afirmación parte de los reportes de la Base de datos sobre eventos de emergencia (EM-DAT) del Centro de Investigación sobre la Epidemiología de los Desastres (CRED) (https://www.emdat.be/) que ha definido un esquema referente a la clasificación de los peligros naturales por tipo de desastre (Tabla 22).

Tabla 22. Clasificación de las amenazas por tipo de desastre.

| Grupo | Subgrupo | Tipo y subtipo | | Grupo | Subgrupo | Tipo |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Natural | Geofísico | Terremoto | | Tecnológico | Accidente industrial | Derrame de sustancias químicas |
| | | Movimiento de masas (seco) | | | | Colapso |
| | | Actividad volcánica | | | | Explosión |
| | Meteorológico | Temperatura extrema | | | | Fuego |
| | | Niebla | | | | Fuga de gas |
| | | Tormentas | | | | Envenenamiento |
| | Hidrológico | Inundación | Inundación costera | | | Radiación |
| | | | Inundación fluvial | | | |
| | | | Inundación repentina | | | |
| | | | Derretimiento de nieve | | | |
| | | Deslizamiento de tierra | Avalancha (nieve, escombros, flujo de lodo, desprendimiento de rocas) | | | Derrame de petróleo |
| | | Acción de las olas | Olas gigantes | | | Otro |
| | | | Seiche | | | |
| | Climatológico | Sequía | | | Accidente de transporte | Aire |
| | | Estallido del lago glacial | | | | Carretera |
| | | Incendio forestal | | | | Carril |
| | Biológico | Epidemia | | | | Agua |
| | | Infestación de insectos | | | Accidente misceláneo | Colapso |
| | | Accidente de animales | | | | Explosión |
| | Extraterrestre | Impacto | | | | Fuego |
| | | Clima espacial | | | | Otro |

Fuente: Centro de Investigación sobre la Epidemiología de los Desastres (CRED) (https://www.emdat.be/classification).

Para la EM-DAT, la definición de un desastre se restringe a un evento que reúne como mínimo uno de los siguientes criterios: (a) diez o más personas reportadas muertas; (b) cien o más personas reportadas afectadas; (c) declaración de estado de emergencia, y (d) solicitud de asistencia internacional. Por otro lado, el término amenaza se refiere a un evento severo o extremo como una inundación, tormenta, ola de frío u ola de calor, etc., que ocurre naturalmente en cualquier parte del mundo (UNDRR y CRED, 2020). Ahora bien, en el antes citado Atlas se señala que la mayoría de las amenazas de tipo natural en el periodo comprendido entre 1970 y 2019 se refieren a inundaciones tanto a nivel global como en Suramérica (Figura 52).

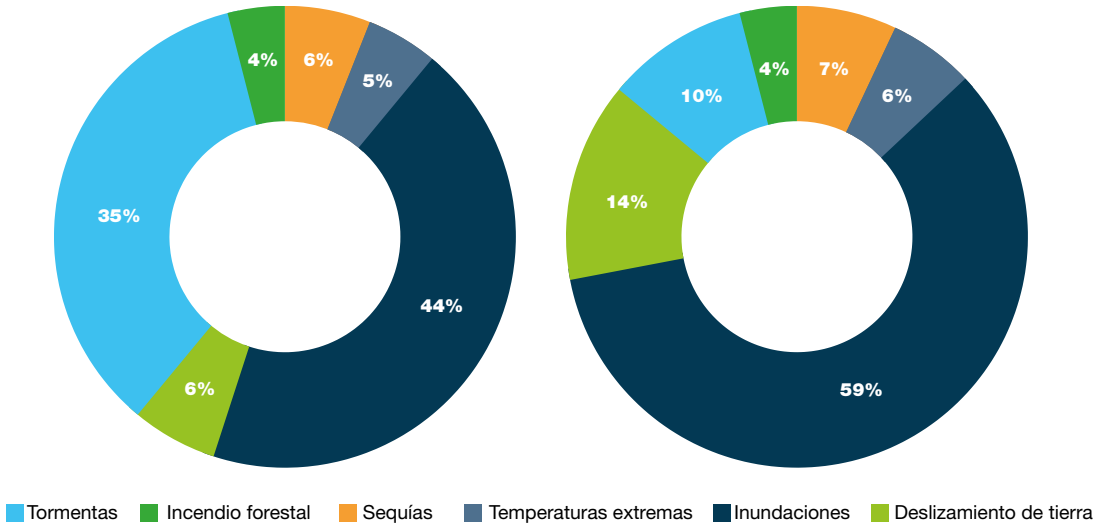



Figura 52. Distribución del porcentaje de desastres por tipo de amenaza con respecto al total mundial (izq.) y porcentaje de desastres con respecto al total de Suramérica (der.).
Fuente: WMO (2021).

En este contexto, se resalta la importancia de entender los procesos de inundación que son fenómenos hidrológicos recurrentes y hacen parte de la dinámica propia de los cuerpos de agua y que pueden ser considerados como un recurso (por ejemplo, favoreciendo la producción agrícola) o como una amenaza debido a las pérdidas físicas, humanas y económicas sobre una población (Ideam, 2017).

En la versión anterior del Estudio Nacional del Agua (ENA, 2018), se definieron las zonas en las cuales se presentan estos fenómenos de manera recurrente nombradas como *zonas potencialmente inundables* (ZPI) y se estimó el grado de intervención antrópica existente en estas. En el estudio, se realiza la actualización del inventario de áreas ocupadas por estas dos características (ZPI e intervenidas) teniendo como insumo base la siguiente información cartográfica:

- Mapa Nacional de Coberturas de la Tierra, escala 1:100.000, periodo 2018. Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia (Ideam, 2021).
- Mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia v2.1 escala 1:100.000 (Ideam et al., 2017).
- Zonificación hidrográfica 2022 escala 1:100.000 (actualización de Ideam, 2022). Ahora bien, es importante señalar que los resultados de zonas potencialmente inundables y de cuerpos de agua lénticos difieren de los ya presentados en el ENA 2018 solo en términos de cálculos de áreas, ya que para este procedimiento se optó por usar como sistema de referencia el nuevo origen único CTM-12 y la actualización de la cobertura de zonificación hidrográfica (2022). Por otro lado, la definición del inventario de eventos de inundación, avenidas torrenciales y crecientes súbitas en términos de su frecuencia de ocurrencia fue realizado a partir de los datos reportados por la UNGRD (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres) (UNGRD, 2021).

#### 3.3.1.1 Productos generados a nivel nacional

En la temática de inundaciones, el Ideam ha desarrollado diversos productos a diferentes escalas, desde nacionales (1:500.000 y 1:100.000) hasta locales (1:2.000) para algunas áreas priorizadas. Estos productos son presentados a continuación: se señalan las extensiones de zonas con potencial de inundación y el uso del suelo que se ha dado al interior de estas; se muestran los mapas de inundaciones asociadas a la ocurrencia de los eventos de La Niña para los años 1988, 2000, 2011 y 2012; y además, el inventario de eventos de inundación, avenidas torrenciales y crecientes súbitas en los niveles departamental y municipal dentro del territorio nacional.

## Zonas potencialmente inundables y ecosistemas acuáticos lénticos y lóticos

En el ENA 2018, el Ideam definió una *zona potencialmente inundable* (ZPI) como aquel terreno o espacio donde se puede acumular y generar una lámina de agua como resultado del desborde de un cuerpo de agua o producto de lluvias localizadas. El esquema de la Figura 53 muestra la metodología para definir las ZPI e identificar los cuerpos de agua lénticos y lóticos a escala nacional. Ahora bien, la delimitación de una ZPI parte del concepto de ecosistemas acuáticos transicionales, definidos en Ideam et al. (2017) como aquellas áreas donde el suelo está saturado de agua o inundado una parte del año, y pueden tener diferente temporalidad de las inundaciones y el drenaje. Los cuerpos de agua corresponden a los demás ecosistemas acuáticos (lóticos y lénticos) existentes en el territorio nacional.

Dado esto, la Tabla 23 presenta de manera tabular la distribución de las áreas entre ZPI y cuerpos de agua (ecosistemas acuáticos lénticos y lóticos) a nivel de zona hidrográfica.

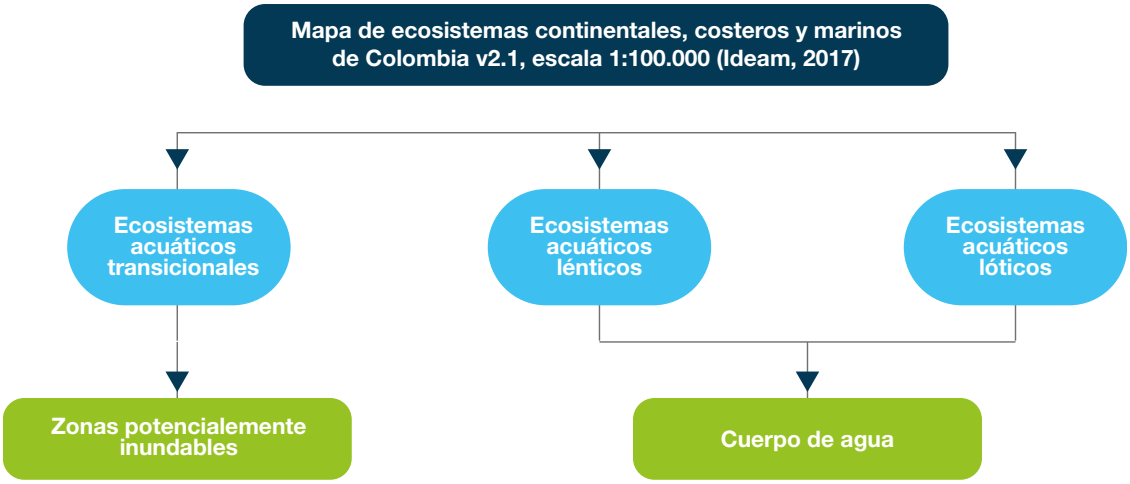



Figura 53. Metodología para la definición de ZPI y cuerpos de agua.

Tabla 23. Áreas de zonas potencialmente inundables y ecosistemas acuáticos (cuerpos de agua) por zona hidrográfica

| Área hidrográfica | Zona hidrográfica | Área (km²)** | |
|---|---|---|---|
| | | Cuerpos de agua (ecosistemas acuáticos lénticos y lóticos) | Zonas potencialmente inundables (ZPI) |
| Amazonas | Amazonas-directos | 205 | 569 |
| | Apaporis | 586 | 6581 |
| | Caguán | 307 | 2229 |
| | Caquetá | 1920 | 10625 |
| | Guainía | 212 | 1192 |
| | Napo | 0 | 1 |
| | Putumayo | 1251 | 7344 |
| | Vaupés | 353 | 2858 |
| | Yarí | 287 | 2692 |

| Área hidrográfica | Zona hidrográfica | Área (km²)** | |
|---|---|---|---|
| | | Cuerpos de agua (ecosistemas acuáticos lénticos y lóticos) | Zonas potencialmente inundables (ZPI) |
| **Total Amazonas** | | **5120** | **34092** |
| Caribe | Atrato-Darién | 1018 | 8754 |
| | Caribe-Guajira | 172 | 572 |
| | Caribe-litoral | 159 | 2637 |
| | Catatumbo | 137 | 460 |
| | Islas Caribe | 0 | 2 |
| | Sinú | 459 | 1621 |
| **Total Caribe** | | **1946** | **14047** |
| Magdalena - Cauca | Alto Magdalena | 612 | 911 |
| | Bajo Magdalena | 696 | 4822 |
| | Bajo Magdalena-Cauca-San Jorge | 2192 | 6901 |
| | Cauca | 1066 | 2623 |
| | Cesar | 812 | 1926 |
| | Medio Magdalena | 1985 | 5511 |
| | Nechí | 195 | 818 |
| | Saldaña | 122 | 10 |
| | Sogamoso | 262 | 482 |
| **Total Magdalena - Cauca** | | **10941** | **24003** |
| Orinoco | Apure | 1 | 2 |
| | Arauca | 361 | 1870 |
| | Casanare | 629 | 14583 |
| | Guaviare | 1763 | 18260 |
| | Inírida | 648 | 6356 |
| | Meta | 2614 | 37402 |
| | Orinoco-directos | 709 | 14748 |
| | Tomo | 252 | 6061 |
| | Vichada | 455 | 7882 |
| **Total área Orinoco** | | **7432** | **107165** |
| Pacífico | Baudó-directos-Pacífico | 152 | 776 |
| | Mira | 116 | 846 |
| | Pacífico-directos | 86 | 554 |
| | Patía | 453 | 3795 |
| | San Juan | 396 | 2210 |
| | Tapaje-Dagua-directos | 446 | 2976 |
| **Total Pacífico** | | **1649** | **11156** |
| **TOTAL NACIONAL** | | **27088** | **190463** |

** Áreas calculadas teniendo en cuenta el Sistema Único de Coordenadas CTM12.

El total de área de las ZPI del país corresponde a 190.436 km²; de este total, el 56,3 % está concentrado en el área hidrográfica del Orinoco, seguido por el Amazonas (17,9 %), Magdalena - Cauca (12,6 %), Caribe (7,4 %) y Pacífico (5,9 %). Por otro lado, las zonas hidrográficas con mayor superficie inundable con respecto al total del área de ZPI nacional se encuentran ubicadas en (a) Meta (Orinoco), que ocupa el 19,6 %; (b) Caquetá (Amazonas), con una superficie del 5,6 %; (c) Bajo Magdalena - Cauca - San Jorge (Magdalena - Cauca), con una superficie del 3,6 %; (d) Atrato Darién (Caribe), con una superficie del 4,6 % y (e) Patía (AH Pacífico), con una superficie del 2,0 %. De igual manera, las zonas hidrográficas con áreas de mayor ocupación de ecosistemas acuáticos lenticos y lóticos son: Bajo Magdalena (Magdalena - Cauca) con una superficie de 13,6 %, seguida por Meta (Orinoco) con 9,7 %; Caquetá (Amazonas) con 7,1 %; Atrato Darién (Caribe) con 3,8 % y Patía con 1,7 % del área total ocupada por estos ecosistemas a nivel nacional.

Desde un punto de vista territorial, se destacan los departamentos de Bolívar, Vichada y Amazonas con la mayor presencia de cuerpos de agua, con áreas de 3161 km², 2349 km² y 2248 km² que corresponden a 11,7 %, 8,7 % y 8,3 % del total nacional, respectivamente. Por otro lado, Casanare, Vichada y Meta son los departamentos con mayor área de zonas potencialmente inundables, con 35.262 km² (18,5 % del total nacional), 31.899 km² (16.7 %), 17.060 km² (9.0%), respectivamente.

El **Anexo 1** incluye las áreas y sus correspondientes porcentajes de ocupación tanto para las ZPI como para los ecosistemas lénticos y lóticos en las 316 subzonas hidrográficas. De estas, las SZH que tienen un mayor porcentaje de área de ZPI con respecto al total nacional son: Bajo San Jorge - La Mojana (3,44 %), río Pauto y otros directos al Meta (3,37 %), Caño Guanápalo y otros directos al Meta (2,97 %), directos al río Meta entre ríos Pauto y Agua Clara (2,73 %) y río Cravo Norte (2,43 %).

## Zonas potencialmente inundables intervenidas de manera antrópica

El trabajo realizado por el Ideam respecto a la actualización de Coberturas de Tierra (Ideam, 2021) ha permitido actualizar estas zonas potencialmente inundables y la medida en qué están intervenidas teniendo como insumos imágenes satelitales del año 2018. Se identifica el grado de intervención antrópica existente sobre las ZPI a partir de aquellas unidades donde existen territorios artificializados o agrícolas, según las siguientes definiciones de Ideam utilizadas desde el ENA 2010:

- **Territorios artificializados.** Comprenden las áreas de las ciudades y las poblaciones, y aquellas áreas periféricas que están siendo incorporadas a las zonas urbanas mediante un proceso gradual de urbanización o de cambio del uso del suelo hacia fines comerciales, industriales, de servicios y recreativos.

- **Territorios agrícolas.** Son los terrenos dedicados principalmente a la producción de alimentos, fibras y otras materias primas industriales, ya sea que se encuentren con cultivos, con pastos, en rotación y en descanso o barbecho. Comprenden las áreas dedicadas a cultivos permanentes, transitorios, áreas de pastos y las zonas agrícolas heterogéneas.

El procedimiento metodológico seguido para la actualización de las áreas o zonas intervenidas por actividad antrópica dentro de las ZPI se presenta en la Figura 54. Allí, a partir de la reclasificación de las unidades antes descritas (territorios artificializados y agrícolas), se definen las *zonas intervenidas por actividad antrópica*. Por otro lado, están las unidades definidas como bosques y áreas seminaturales en el ENA 2018 con base en el mapa de coberturas 2010-2012; en esta actualización, se identifican como *zonas naturales o seminaturales* según el mapa de coberturas 2018.

Dado esto, en la Tabla 24 y en la Figura 55 se presentan las zonas potencialmente inundables intervenidas por actividad antrópica, naturales y seminaturales respecto al total nacional de ZPI. Nótese que, dentro del área hidrográfica del Orinoco, el espacio ocupado por las ZPI intervenidas por actividad antrópica corresponde a 15.924 km², lo que constituye el 39 % del total a nivel nacional de las áreas modificada por actividades agrícolas o de urbanización; mientras tanto, para

el área hidrográfica Magdalena-Cauca estas zonas ocupan 14.254 km² (35 %); con relación a las demás áreas, el territorio ocupado es de 5481 km² (13 %), 3423 km² (8 %) y 1861 km² (5 %), para el Caribe, Amazonas y Pacífico, respectivamente.

Por otro lado, se calculó el cambio (Tabla 24) en las coberturas de tierra existentes dentro de las ZPI teniendo como fuente de información la capa de Cobertura de la Tierra 2010-2012 presentada en el ENA (2018) y el Mapa de Cobertura de la Tierra 2018. Para esto, se recalcularon las áreas teniendo en cuenta el nuevo sistema de coordenadas CTM12 y la nueva capa de zonificación hidrográfica 2022. De esta manera, se puede ver que, para el área hidrográfica del Amazonas, dos de los mayores cambios se ven reflejados en la zona hidrográfica del Putumayo, donde las áreas transformadas se redujeron (valores negativos) en 305 km², mientras aumentaron (valores positivos) 263 km² en áreas de cobertura natural; caso contrario ocurre en la zona hidrográfica del Caguán, en donde se aumentaron las zonas transformadas en 139 km² y se perdieron 176 km² de zonas naturales. A escala de área hidrográfica, el Orinoco presenta la mayor pérdida de coberturas naturales dentro de las ZPI (9459 km², 9 %), seguida por Magdalena-Cauca (4197 km², 17 %) y Caribe (1098 km², 8 %).Por otro lado, el área hidrográfica que aumentó en mayor medida sus zonas intervenidas fue el Orinoco (7170 km², 7 %).

Es importante anotar que el cambio de coberturas aquí presentado se realizó asumiendo que los límites de las ZPI no cambiaron en el tiempo (aún no se cuenta con información nueva para su actualización), lo que implica que no se pueden considerar variaciones reales sobre el terreno, como la divagación de los ríos. Sin embargo, el Mapa de Cobertura de la Tierra 2018 utilizado en este ENA contiene resultados mucho más elaborados que el de 2012, dado que las herramientas empleadas para su desarrollo, tanto a nivel de calidad de insumos como de tecnologías de procesamiento y posprocesamiento, han mejorado de manera considerable.

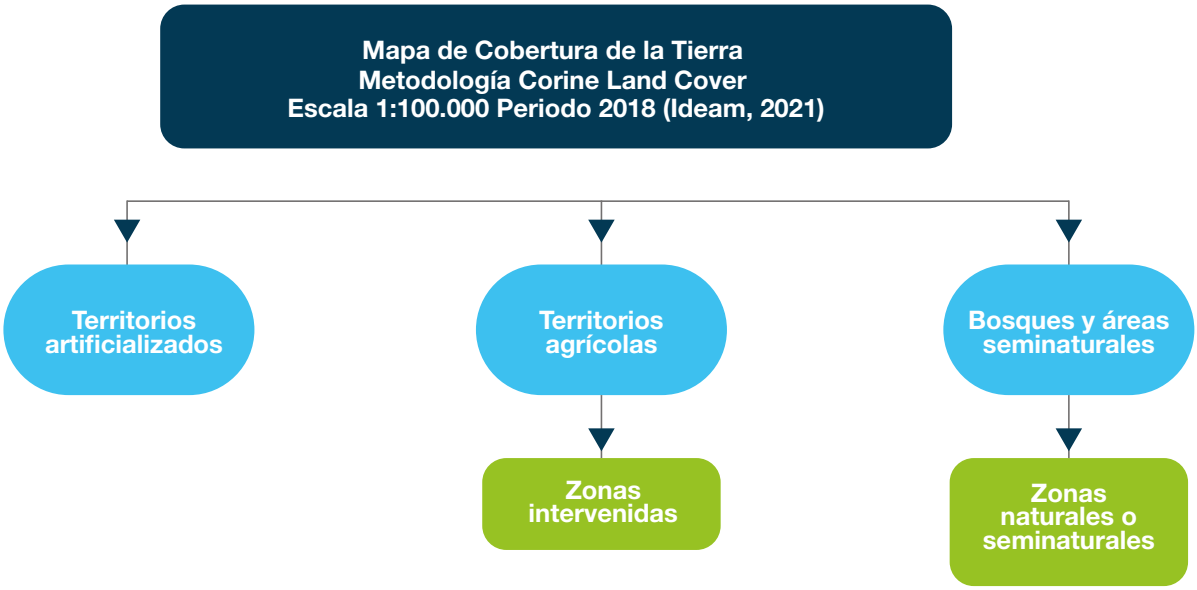



Figura 54. Metodología para la identificación de zonas intervenidas por actividad antrópica dentro de las ZPI.

Tabla 24. Áreas de zonas potencialmente inundables naturales y transformadas.

| Área hidrográfica | Zona hidrográfica | Área (km²) | Área (km²) | | Cambio en área entre 2010, 2012 y 2018 (km²) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ZPI | Transformada | Natural | Transformada | Natural |
| Amazonas | Amazonas directos | 569 | 5 | 555 | -28 | 19 |
| | Apaporis | 6581 | 152 | 6420 | -9 | 0 |
| | Caguán | 2229 | 996 | 1196 | 139 | -176 |
| | Caquetá | 10625 | 1320 | 9229 | -19 | -57 |
| | Guainía | 1192 | 16 | 1173 | -7 | 4 |
| | Napo | 0.96 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | Putumayo | 7344 | 618 | 6685 | -305 | 263 |
| | Vaupés | 2858 | 235 | 2596 | -39 | 12 |
| | Yarí | 2692 | 80 | 2606 | 24 | -30 |
| **Total Amazonas** | | **34092** | **3423** | **30461** | **--** | **--** |
| Caribe | Atrato-Darién | 8754 | 1825 | 6282 | 23 | -628 |
| | Caribe-Guajira | 572 | 111 | 217 | 3 | -249 |
| | Caribe-litoral | 2637 | 2062 | 488 | -90 | 3 |
| | Catatumbo | 460 | 317 | 130 | 39 | -53 |
| | Islas Caribe | 1.65 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| | Sinú | 1621 | 1166 | 223 | -65 | -168 |
| **Total Caribe** | | **14047** | **5481** | **7340** | **--** | **--** |
| Magdalena - Cauca | Alto Magdalena | 911 | 681 | 194 | -35 | -1 |
| | Bajo Magdalena | 4822 | 2100 | 1446 | 6 | -1283 |
| | Bajo Magdalena-Cauca-San Jorge | 6901 | 4336 | 1465 | 234 | -1334 |
| | Cauca | 2623 | 1814 | 483 | -8 | -318 |
| | Cesar | 1926 | 1101 | 495 | -98 | -233 |
| | Medio Magdalena | 5511 | 3332 | 1147 | -224 | -807 |
| | Nechí | 818 | 510 | 158 | 46 | -197 |
| | Saldaña | 9.51 | 7 | 2 | -3 | 2 |
| | Sogamoso | 482 | 374 | 78 | -4 | -25 |
| **Total Magdalena - Cauca** | | **24003** | **14254** | **5467** | **--** | **--** |

| Área hidrográfica | Zona hidrográfica | Área (km²) | Área (km²) | | Cambio en área entre 2010, 2012 y 2018 (km²) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ZPI | Transformada | Natural | Transformada | Natural |
| Orinoco | Apure | 1.56 | | 2 | 0 | 0 |
| | Arauca | 1870 | 590 | 1234 | 294 | -341 |
| | Casanare | 14583 | 1913 | 11984 | 1471 | -2157 |
| | Guaviare | 18260 | 1919 | 16164 | 600 | -777 |
| | Inírida | 6356 | 220 | 6122 | 3 | -17 |
| | Meta | 37402 | 10146 | 26206 | 3991 | -5041 |
| | Orinoco-directos | 14748 | 466 | 14152 | 385 | -515 |
| | Tomo | 6061 | 355 | 5593 | 198 | -312 |
| | Vichada | 7882 | 317 | 7495 | 228 | -298 |
| **Total Orinoco** | | **107165** | **15924** | **88952** | **--** | **--** |
| Pacífico | Baudó directos Pacífico | 776 | 109 | 654 | -71 | 58 |
| | Mira | 846 | 180 | 607 | -16 | -41 |
| | Pacífico-directos | 554 | 98 | 438 | -9 | -8 |
| | Patía | 3795 | 646 | 3016 | -182 | 51 |
| | San Juan | 2210 | 318 | 1852 | -8 | -30 |
| | Tapaje-Dagua-directos | 2976 | 510 | 2421 | -281 | 236 |
| **Total Pacífico** | | **11156** | **1861** | **8988** | **--** | **--** |
| **Total nacional** | | **190463** | **40943** | **141208** | **--** | **--** |

Son de resaltar las áreas intervenidas por actividades agrícolas y artificializadas dentro de las zonas potencialmente inundables en los departamentos de Casanare y Antioquia con áreas que alcanzan los 8847 km² y 3689 km², respectivamente; mientras que las Islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, así como los departamentos de Risaralda y Amazonas presentan los menores cambios en sus coberturas con 0 km², 3 km² y 47 km², respectivamente.

En el **Anexo 1** se incluyen las áreas y sus correspondientes porcentajes de ocupación de zonas potencialmente inundables, naturales o seminaturales e intervenidas, por actividad antrópica, para las 316 subzonas hidrográficas. Se resaltan las SZH con mayor porcentaje de área con respecto al total nacional de zonas intervenidas por actividad antrópica. En particular las de: Bajo San Jorge - La Mojana, con el 9,89 %; río Pauto y otros directos al Meta (4,69 %); Caño Guanápalo y otros directos al Meta (3,46 %), río Túa y otros directos al Meta (3,28 %) y río Cusiana (3,01 %).

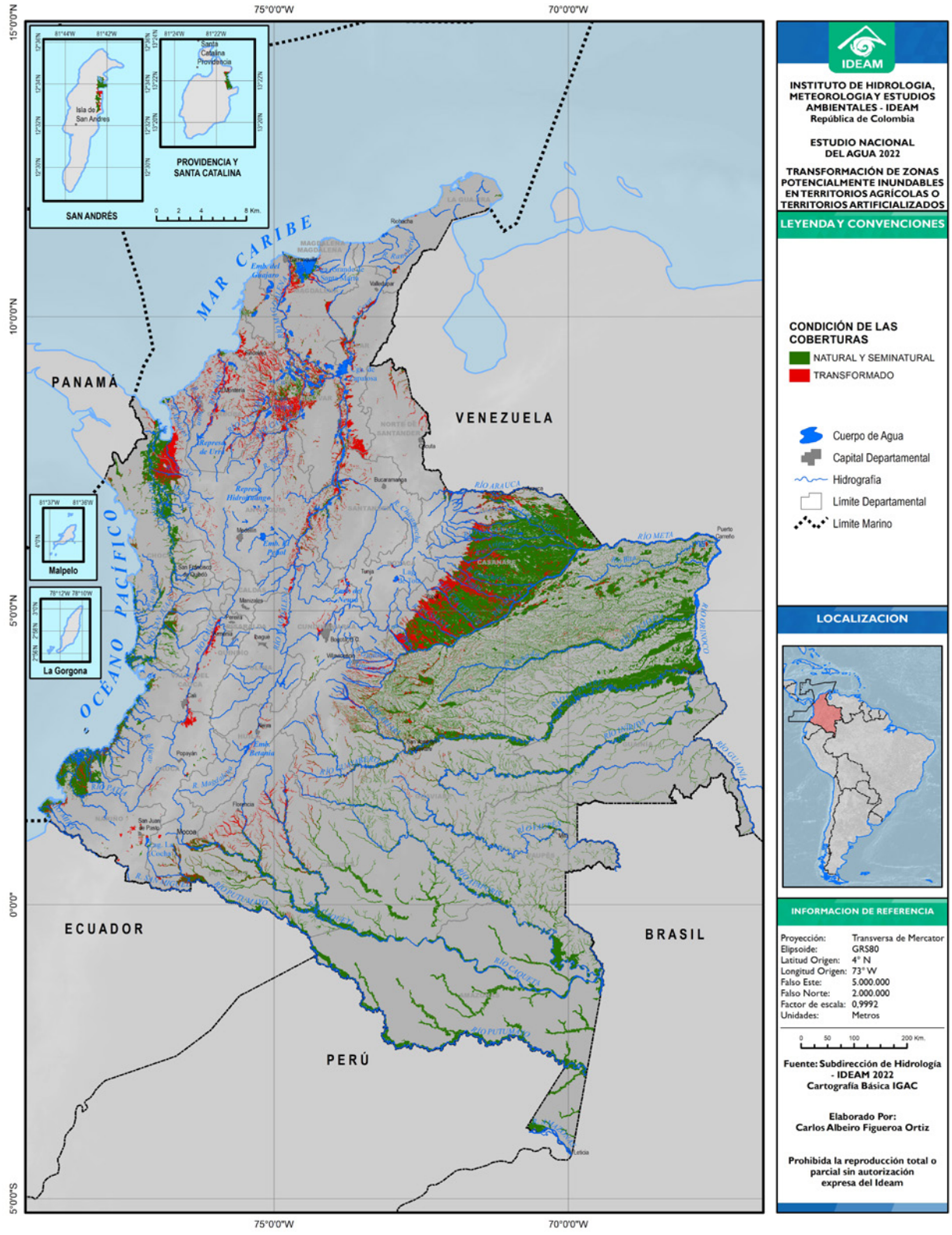



Figura 55. Zonas potencialmente inundables naturales o seminaturales e intervenidas por actividad antrópica.

## Mapas de inundaciones asociadas a la ocurrencia de fenómenos La Niña

Es importante señalar que, a partir de información satelital, el Ideam ha evaluado la extensión de inundaciones asociadas con la ocurrencia de fenómenos La Niña de diferente intensidad para los años 1988, 2000, 2010-2011 y 2011-2012 a escala 1:100.000 (Figura 56). Esta evaluación está concentrada en las regiones andina, pacífica y caribe por ser las que experimentaron las más altas precipitaciones durante el evento 2010-2011, así como la mayor afectación por inundaciones. Estos productos se encuentran disponibles en el geovisor institucional del Ideam en la dirección http://www.ideam.gov.co/capas-geo. Dicha información puede ser descargada en formato Shapefile, así como sus metadatos y catálogo de objetos, realizando filtros mediante la caja de búsqueda por áreas afectadas por inundación por La Niña 1988, 2000, 2011 y 2012.

Las inundaciones en Colombia han generado pérdidas excepcionales; causa de esto puede ser la ocupación no planificada del territorio. De esta forma, la información producida y divulgada por medio de estos mapas tiene como propósito ofrecer —a las entidades públicas y a la población en general— escenarios geográficos que muestren las áreas afectadas por este tipo de eventos, los cuales pueden variar según el grado de intensidad con que se manifiesten. Además, se puede incluir como información base para orientar acciones de carácter nacional y como referente para implementar las líneas de trabajo en la reducción y gestión de riesgo (Ideam et al., 2012).

## Eventos de inundación, avenidas torrenciales y crecientes súbitas

En paralelo con estos estudios, para el Ideam resulta de gran interés cuantificar los eventos extremos declarados de carácter hidrometeorológico en los niveles municipal y departamental con el fin de integrarlos en diferentes tipos de análisis; estos resultados se enfocan, más que todo, a tomadores de decisiones para la gestión de su territorio. Estos eventos son entendidos como una eventualidad, un hecho imprevisto que puede acaecer y producir efectos adversos sobre las vidas humanas, la salud y la infraestructura económica, social y ambiental de un territorio (UNGRD, 2017). En particular, se presenta la evolución de eventos de inundación, avenidas torrenciales y crecientes súbitas a nivel departamental para el periodo comprendido entre el 2000 y el 2021.

El inventario de eventos de inundación, avenidas torrenciales y crecientes súbitas sobre el territorio nacional se elaboró a partir del consolidado de emergencias realizado por la UNGRD (2021) para los años del 2000 al 2021, y se identificaron un total de 15.898 eventos. En particular, los departamentos de Cundinamarca (1133 eventos) y Antioquia (1124 eventos) fueron los que presentaron el mayor registro de eventos de inundación reportados. En cuanto a municipios, los que más se vieron afectados por este tipo de eventos fueron Bogotá, Villavicencio, Barranquilla, Ibagué y Pereira (Figura 57).

Respecto a avenidas torrenciales y crecientes súbitas, la Figura 58 muestra que los departamentos de Cauca, Antioquia y Norte de Santander presentan las mayores incidencias. Se resalta que a nivel municipal Inzá, Miranda y Corinto (todos ubicados dentro del departamento de Cauca) son los que evidencian mayor número de estos eventos.

El consolidado de eventos de inundación a escala nacional para el periodo comprendido entre el 2000 y el 2021 se muestra en la Figura 59. Se grafican todos los 13.577 eventos registrados. La mayor cantidad de inundaciones se presentaron en el año 2011, representando un 13 % del total reportado. Es importante señalar que los registros analizados presentan un mayor detalle en su caracterización por parte de la UNGRD a partir de ese mismo año.

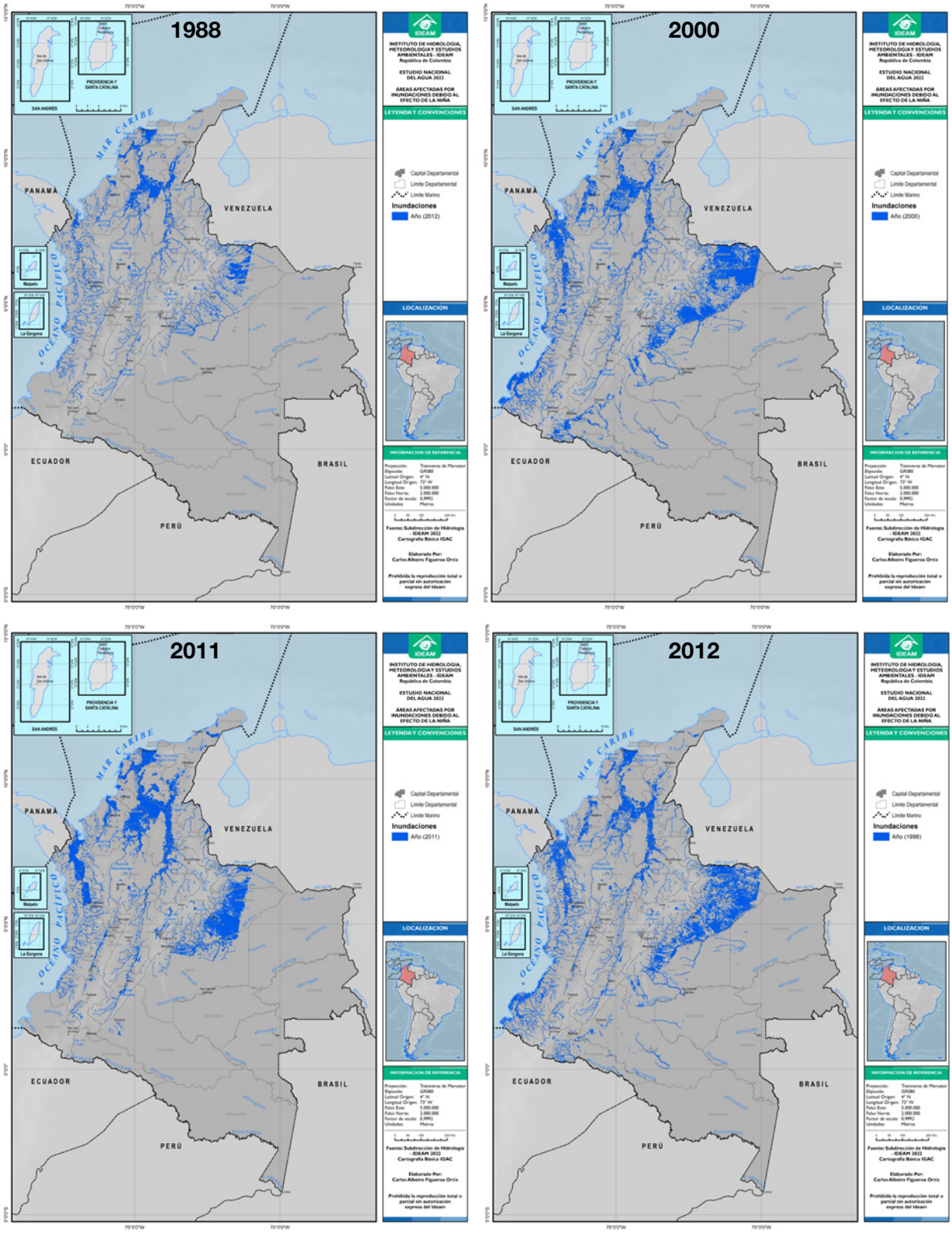



Figura 56. Coberturas de extensión de inundaciones por fenómenos de La Niña 1988, 2000, 2011 y 2012.

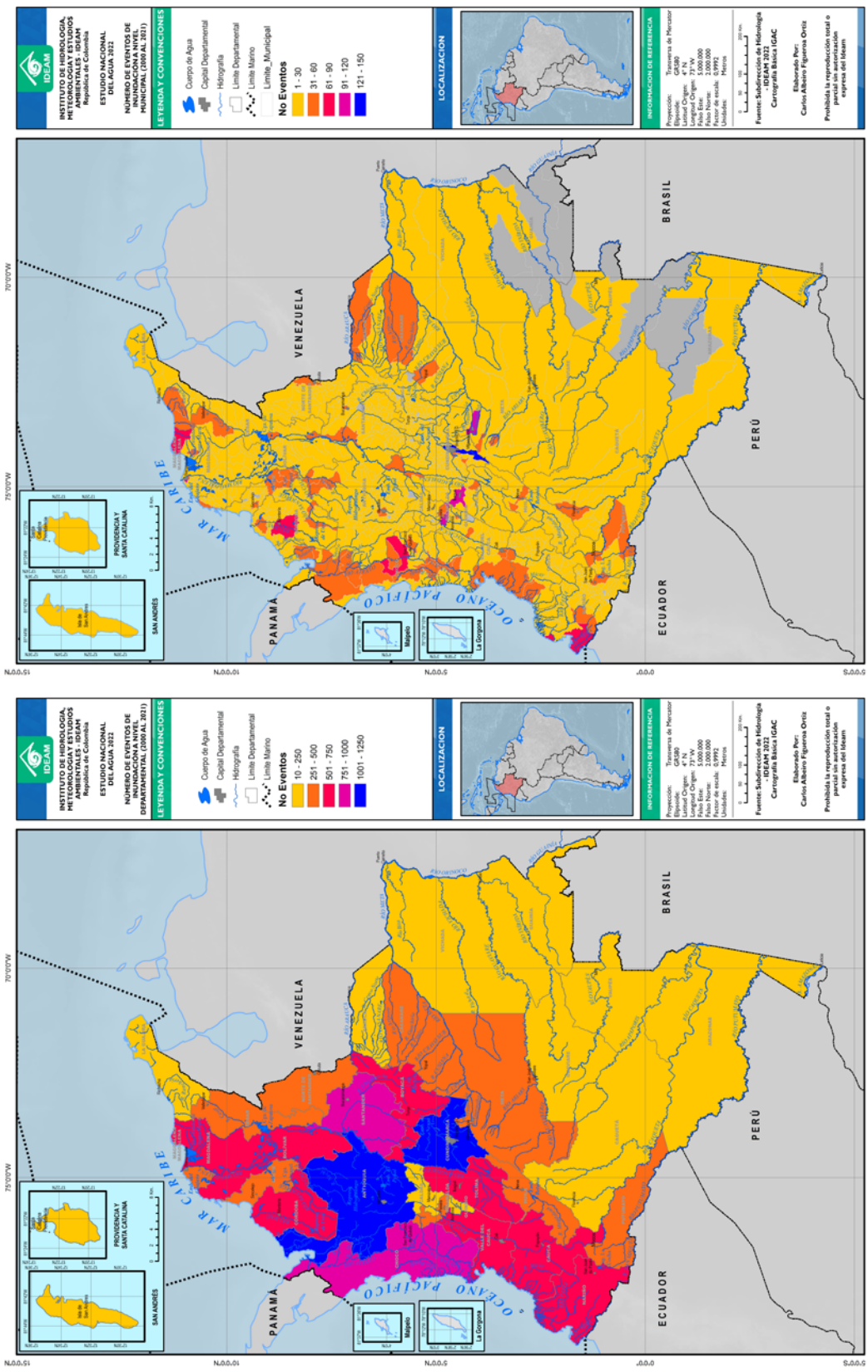



Figura 57. Número de eventos de inundación en los niveles departamental y municipal registrados en el periodo comprendido entre los años 2000 y 2021; consolidado del reporte de emergencias (UNGRD, 2021).

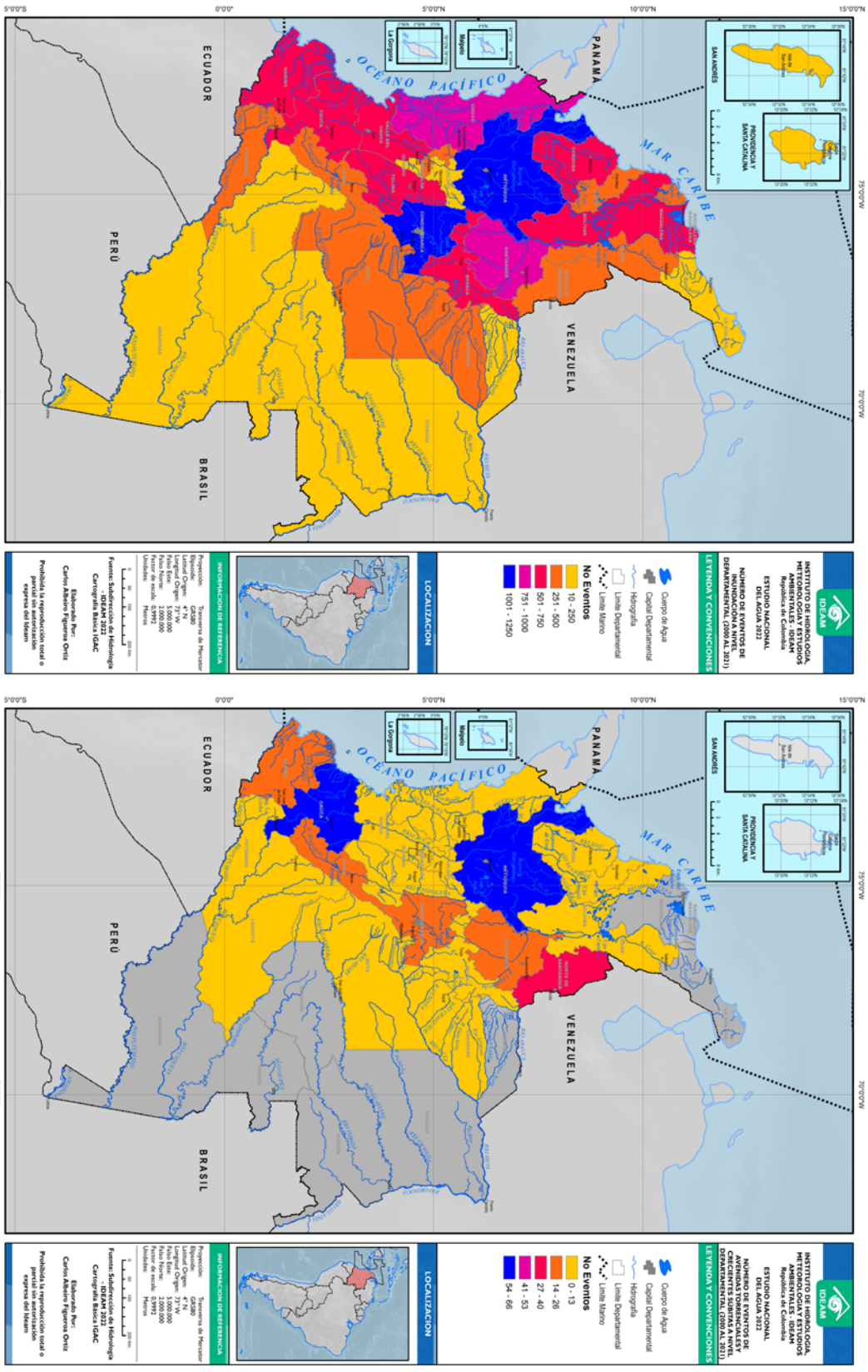



Figura 58. Número de eventos de avenidas torrenciales y crecientes súbitas en los niveles departamental y municipal registrados en el periodo comprendido entre los años 2000-2021, consolidado del reporte de emergencias 2018-2021 (UNGRD, 2021).

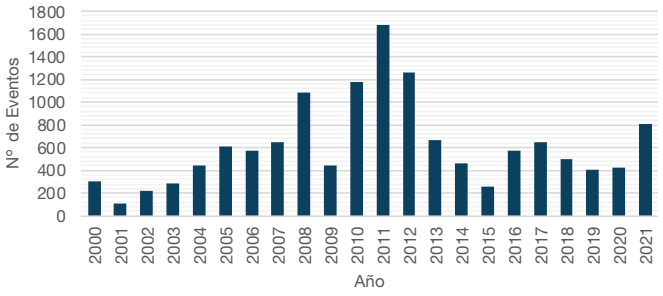



Figura 59. Consolidado de eventos de inundación a nivel nacional para el periodo comprendido entre 2000 y 2021.

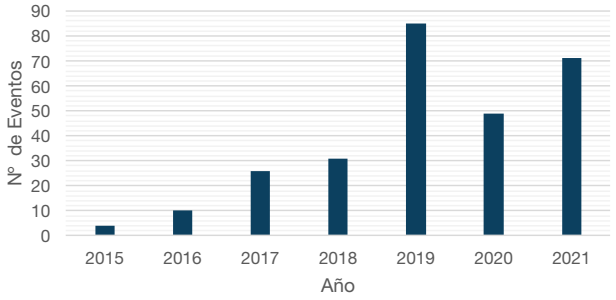



Figura 60. Consolidado de eventos de avenidas torrenciales a nivel nacional para el periodo comprendido entre los años 2015 y 2021.

Con respecto a las avenidas torrenciales, las bases de datos de la UNGRD (2021) indican que solo en años recientes (desde 2015) se comenzaron a registrar explícitamente este tipo de eventos. Para este periodo, se reportaron un total de 269 eventos, con un pico en el 2019, seguido por el año 2021, que representaron un 31 % y un 21 % del total de eventos reportados (Figura 60).

Dentro del marco misional del Ideam es fundamental la producción de información como apoyo a la cimentación de decisiones en política ambiental nacional y el ordenamiento del territorio en torno al agua; esto implica mejorar y consolidar la información base que tiene el país en cuanto a la dinámica de las inundaciones a escala nacional y relacionadas con efectos de la variabilidad climática, como el fenómeno de La Niña, de tal manera que se pueda caracterizar la extensión de las inundaciones, su frecuencia y duración para la evaluación del riesgo, y la cuantificación de daños y pérdidas en diferentes regiones del país.

En un segundo momento, la gestión en torno al agua requerirá de avances prioritarios en la definición de rondas hídricas y su incorporación en el ordenamiento territorial para la evaluación de la amenaza, vulnerabilidad, exposición y riesgo por inundaciones. Esto requerirá un mayor detalle en estos estudios, ámbito en el cual el Ideam también ha avanzado, y se presentan a continuación en este documento. Avanzar en este contexto en torno al plan nacional de gestión de riesgos y desastres y a la gestión de recurso hídrico de forma articulada permitirá al país, de manera gradual, reducir el efecto de las inundaciones y mejorar el conocimiento sobre el tema.

#### 3.3.1.2 Productos generados en los niveles regional y local

En los niveles regional y local, el Ideam ha continuado en la elaboración de mapas de inundación con base en los procedimientos establecidos en la *Guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación* (Ideam, 2017). La Figura 61 y la Tabla 25 presentan la ubicación de los centros poblados para los cuales se han elaborado estudios de amenaza de inundación desde el año 2018 hasta la fecha y cuentan con mapas de profundidad (metros), velocidad (metros/segundo) y amenaza de inundación (categoría alta, media y baja) para diferentes *periodos de retorno* (2, 33, 10, 20, 50 y 100 años) a escala 1:2000.

Es de mencionar que el objetivo de estos mapas es, entre otros, contribuir a la evaluación del riesgo de inundación, al desarrollo de planes de mitigación de inundaciones, a la preparación de esquemas de manejo integral del riesgo de inundación y, en particular, a la planificación urbana local.

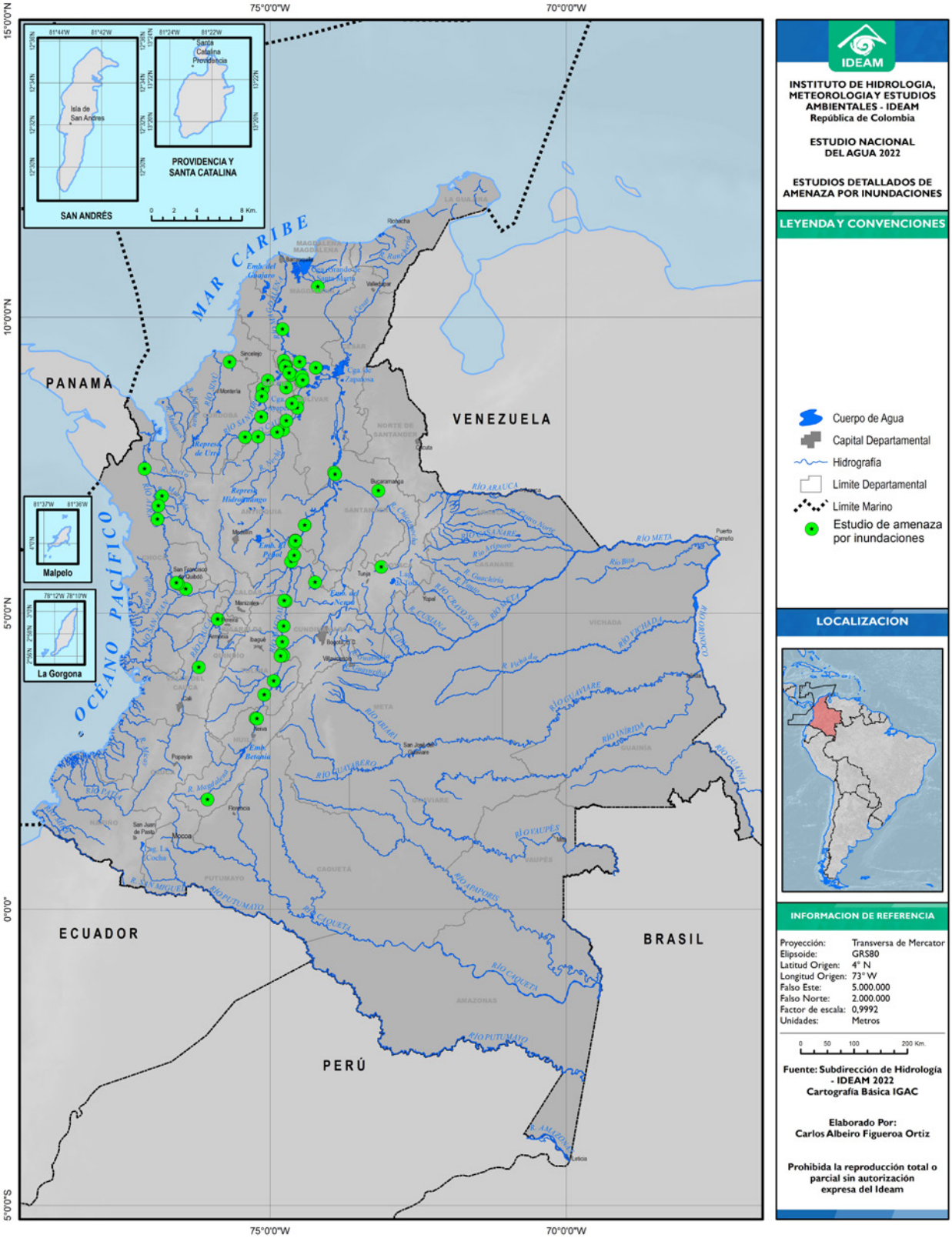



Figura 61. Localización de municipios con estudios de amenaza por inundación (datos Ideam).

Tabla 25. Mapas de inundación generados entre 2018 y 2021 a escala 1:2000.

| Nro. | Centro poblado | Municipio | Departamento | Año |
|---|---|---|---|---|
| 1 | La Sierra | Puerto Nare | Antioquia | 2018 |
| 2 | Puerto Berrío | Puerto Berrío | Antioquia | 2018 |
| 3 | Puerto Nare | Puerto Nare | Antioquia | 2018 |
| 4 | Puerto Perales | Puerto Triunfo | Antioquia | 2018 |
| 5 | Puerto Triunfo | Puerto Triunfo | Antioquia | 2018 |
| 6 | Cantagallo | Cantagallo | Bolívar | 2018 |
| 7 | Puerto Boyacá | Puerto Boyacá | Boyacá | 2018 |
| 8 | Puerto Serviez | Puerto Boyacá | Boyacá | 2018 |
| 9 | Girardot | Girardot | Cundinamarca | 2018 |
| 10 | Guataquí | Guataquí | Cundinamarca | 2018 |
| 11 | Puerto Bogotá | Guaduas | Cundinamarca | 2018 |
| 12 | Ricaurte | Ricaurte | Cundinamarca | 2018 |
| 13 | Aipe | Aipe | Huila | 2018 |
| 14 | Villavieja | Villavieja | Huila | 2018 |
| 15 | Puerto Olaya | Cimitarra | Santander | 2018 |
| 16 | Puerto Wilches | Puerto Wilches | Santander | 2018 |
| 17 | Ambalema | Ambalema | Tolima | 2018 |
| 18 | Flandes | Flandes | Tolima | 2018 |
| 19 | Guataquisito | Piedras | Tolima | 2018 |
| 20 | Honda | Honda | Tolima | 2018 |
| 21 | Natagaima | Natagaima | Tolima | 2018 |
| 22 | Purificación | Purificación | Tolima | 2018 |
| 23 | Murindó | Murindó | Antioquia | 2019 |
| 24 | Opogadó | Murindó | Antioquia | 2019 |
| 25 | Vigía del Fuerte | Vigía del Fuerte | Antioquia | 2019 |
| 26 | Atrato (Yuto) | Atrato (Yuto) | Chocó | 2019 |
| 27 | Bagadó | Bagadó | Chocó | 2019 |
| 28 | Bojayá (Bellavista) | Bojayá (Bellavista) | Chocó | 2019 |
| 29 | Boraudó | Lloró | Chocó | 2019 |
| 30 | Carmen del Darién (Curbaradó) | Carmen del Darién (Curbaradó) | Chocó | 2019 |
| 31 | Domingodó | Carmen del Darién (Curbaradó) | Chocó | 2019 |
| 32 | La Vuelta | Cértegui | Chocó | 2019 |
| 33 | Lloró | Lloró | Chocó | 2019 |
| 34 | Medio Atrato (Beté) | Medio Atrato (Beté) | Chocó | 2019 |
| 35 | Quibdó | Quibdó | Chocó | 2019 |
| 36 | Riosucio | Riosucio | Chocó | 2019 |
| 37 | Tagachí | Quibdó | Chocó | 2019 |

Estos estudios detallados tienen como objetivo primordial aportar insumos, para las entidades y la comunidad en general, que permitan orientar la reglamentación en el uso de suelo y la gestión territorial, facilitando así construir comunidades más resilientes a este tipo de eventos, creando conciencia sobre las áreas bajo amenaza y su probabilidad de ocurrencia y el desarrollo de estrategias para su reducción. Al igual que los mapas de inundaciones asociados a la ocurrencia del fenómeno de La Niña, los mapas de amenaza por inundación asociados a estos estudios se encuentran disponibles en el geovisor institucional del Ideam disponible en el enlace http://www.ideam.gov.co/capas-geo.

## 3.3.2 Cuerpos de agua lénticos

La definición de cuerpos lénticos se basa en la extracción y agrupación de todos los ecosistemas acuáticos de ambiente léntico del *Mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia* (Ideam et al., 2017), donde se definen como lagos o lagunas a los cuerpos de agua dulce que se encuentran alejados del mar y suelen tener un origen glaciar, tectónico o aluvial. La agrupación de las diferentes clases de cuerpos lénticos parte de las siguientes consideraciones definidas por el Ideam en el ENA 2018: (a) *embalses*: hacen parte de los cuerpos de agua artificiales y su principal rasgo es que son construidos por el hombre; (b) *lagos y lagunas:* cuerpos de agua dulce que se encuentra alejados del mar y están asociados a un origen glaciar, tectónico o aluvial; (c) *ciénagas:* se identifican como tales las lagunas de origen aluvial y las lagunas costeras.

### 3.3.2.1 Distribución de cuerpos de agua lénticos por zona hidrográfica

La Tabla 26 presenta la distribución de cuerpos lénticos sobre el territorio nacional, donde se observa que la mayoría de las ciénagas y embalses se encuentran ubicadas en el área hidrográfica Magdalena - Cauca. Y la mayor parte de lagos y lagunas se hallan en el área hidrográfica del Orinoco.

Los departamentos de Bolívar y Magdalena presentan la mayor cobertura referente a ciénagas, con áreas de 2520 km² y 1882 km² que corresponden con el 27 % y 20 % del total nacional, respectivamente. La mayor ocupación de embalses en el territorio nacional está en los departamentos de Antioquia (150 km²) y Atlántico (138 km²), lo que representa el 23 % y 21 % del total de área de embalses en el país. En contraste con estas cifras, los lagos y las lagunas se concentran en los departamentos de Boyacá y Nariño con áreas de 63 km² y 48 km², lo que representa el 37 % y el 28 % del área existente de estas unidades en el territorio nacional.

Tabla 26. Distribución de cuerpos de agua lénticos por zona hidrográfica.

| Área hidrográfica | Zona hidrográfica | Área (km²) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Ciénaga | Embalses | Lagos y lagunas |
| Amazonas | Amazonas-directos | 7,1 | -- | -- |
| | Apaporis | 62,6 | -- | -- |
| | Caguán | 30,9 | -- | -- |
| | Caquetá | 92,4 | -- | -- |
| | Guainía | 0,3 | -- | -- |
| | Putumayo | 79,8 | -- | 44,4 |
| | Vaupés | 13,4 | -- | -- |
| | Yarí | 15,9 | -- | -- |
| **Total Amazonas** | | **302,4** | **--** | **44,4** |

| Área hidrográfica | Zona hidrográfica | Área (km²) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Ciénaga | Embalses | Lagos y lagunas |
| Caribe | Atrato-Darién | 346,3 | -- | -- |
| | Caribe-Guajira | 91,9 | 0,5 | -- |
| | Caribe-litoral | 87,3 | 0,8 | -- |
| | Catatumbo | 0,5 | -- | 0,3 |
| | Sinú | 263,4 | 71,7 | -- |
| **Total Caribe** | | **789,4** | **73** | **0,3** |
| Magdalena - Cauca | Alto Magdalena | 6,6 | 161,2 | 10,5 |
| | Bajo Magdalena | 3032,8 | 152,0 | 5,1 |
| | Bajo Magdalena-Cauca-San Jorge | 1963,0 | 0,6 | -- |
| | Cauca | 523,8 | 20,7 | 4,5 |
| | Cesar | 703,5 | 3,4 | 0,7 |
| | Medio Magdalena | 733,0 | 121,2 | 0,3 |
| | Nechí | 18,5 | 39,5 | -- |
| | Saldaña | 0,7 | -- | 1,6 |
| | Sogamoso | 38,6 | 10,8 | 29,0 |
| **Total Magdalena - Cauca** | | **7020,5** | **509,4** | **51,7** |
| Orinoco | Arauca | 33,3 | 0,7 | 2,1 |
| | Casanare | 141,5 | -- | 2,1 |
| | Guaviare | 266,7 | -- | 6,3 |
| | Inírida | 154,2 | -- | -- |
| | Meta | 213,9 | 36,4 | 60,5 |
| | Orinoco-directos | 110,7 | -- | -- |
| | Tomo | 44,8 | -- | -- |
| | Vichada | 42,5 | -- | -- |
| **Total Orinoco** | | **1007,6** | **37,1** | **71** |
| Pacífico | Mira | -- | -- | 0,3 |
| | Pacífico-directos | 0,7 | -- | -- |
| | Patía | 77,8 | 2,6 | 2,8 |
| | San Juan | -- | 20,1 | -- |
| | Tapaje-Dagua-directos | -- | 1,9 | -- |
| **Total Pacífico** | | **78,5** | **24,6** | **3,1** |
| **Total nacional** | | **9198,4** | **644,1** | **170,5** |

### 3.3.2.2 Estudios de caracterización de cuerpos de agua lénticos

A escala local, tanto el Ideam como otros actores han avanzado en conjunto en la caracterización hidrológica, hidráulica, hidrobiológica, fisicoquímica y sedimentológica de diferentes cuerpos de agua, los cuales se presentan en la Tabla 27.

### Avances en el conocimiento sobre la hidrología de la cuenca del lago de Tota

En el marco del proyecto regional «Adaptación a los impactos del cambio climático en recursos hídricos en los Andes (AICCA)» de 2020 —y con la participación de entidades como Ideam, Corpoboyacá, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Global Environment Facility (GEF), Banco de Desarrollo de América Latina (CAF) y Consorcio Sostenible para la Ecorregión Andina (Condesan)— se generaron insumos y se crearon procesos para la gestión hídrica frente a la oferta y la disponibilidad del agua a partir de la modelación hidrológica de la cuenca del lago de Tota.

Para el desarrollo de este proyecto, el Ideam elaboró dos grandes productos: el levantamiento topobatimétrico de detalle del lago (Figura 62) y la construcción de las curvas de capacidad de este, las cuales definen la relación entre las cotas y las área del espejo de agua correspondiente, y de estas cotas con el volumen de almacenamiento asociado (Figura 63), así como el área del espejo de agua dada la cota a la que se encuentra el nivel del agua en su interior.

A partir del detalle de este producto, se determinó que la cota de referencia del lago de Tota para el año 2019 (es decir, el límite máximo altitudinal del cuerpo de agua) corresponde a 3015 m s. n. m. y su volumen de almacenamiento, así como el área del espejo de agua a esta cota, corresponde a 1854,81 millones de metros cúbicos ($Mm^3$) y 55,15 kilómetros cuadrados ($km^2$), respectivamente. También se encontraron profundidades máximas cercanas a los 65 metros, localizadas muy cercana a la zona conocida como Playa Blanca (sector suroccidental). Cerca de la isla Santa Isabel se localizaron profundidades del orden de 55 m y de 57 m cerca a la isla San Pedro; hacia la zona occidental del lago, entre las islas Cerro Chino y Custodia, se encontraron variaciones de profundidad entre 29 y 34 metros.

Por otro lado, se desarrolló una modelación hidrológica en la cuenca del lago de Tota, a partir de la cual se obtuvo una reconstrucción de la hidrología de la cuenca, estimación de impactos de la variabilidad y cambio climático (VC/CC), y evaluación de patrones geográficos y estacionales de la oferta y la demanda en el sitio de interés (Peña, 2020).

Este estudio de Peña responde a varias interrogantes tales como: ¿cuánto aportan al lago las corrientes que no tienen medición de caudales?; ¿cuánto aportan en realidad los caudales desviados del río Olarte al lago de Tota?; de las pérdidas por consumo de agua, ¿cuáles sectores representan la mayor demanda del recurso hídrico?; bajo un escenario de lluvias extremas, ¿qué cota alcanzaría la lámina de agua del lago?; ¿cómo cambia el balance hídrico futuro bajo los escenarios de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC)?; ¿cómo cambia el balance hídrico si aumenta la demanda de extracción del lago?; estas, entre otras interrogantes.

Tabla 27. Estudios realizados sobre cuerpos lénticos a nivel local.

| Lugar del estudio | Tipo de estudio | Fecha |
|---|---|---|
| Cuenca del lago de Tota | Modelación hidrológica y levantamiento topobatimétrico | 2020 |
| Cuenca del río Cesar | Modelación hidrológica | 2021 |
| Complejo cenagoso ciénaga de Zapatosa | Modelación ecohidrológica (trófica e hidrodinámica) | |
| Complejo cenagoso ciénaga de Ayapel | Modelación hidrológica y socioecológica | |

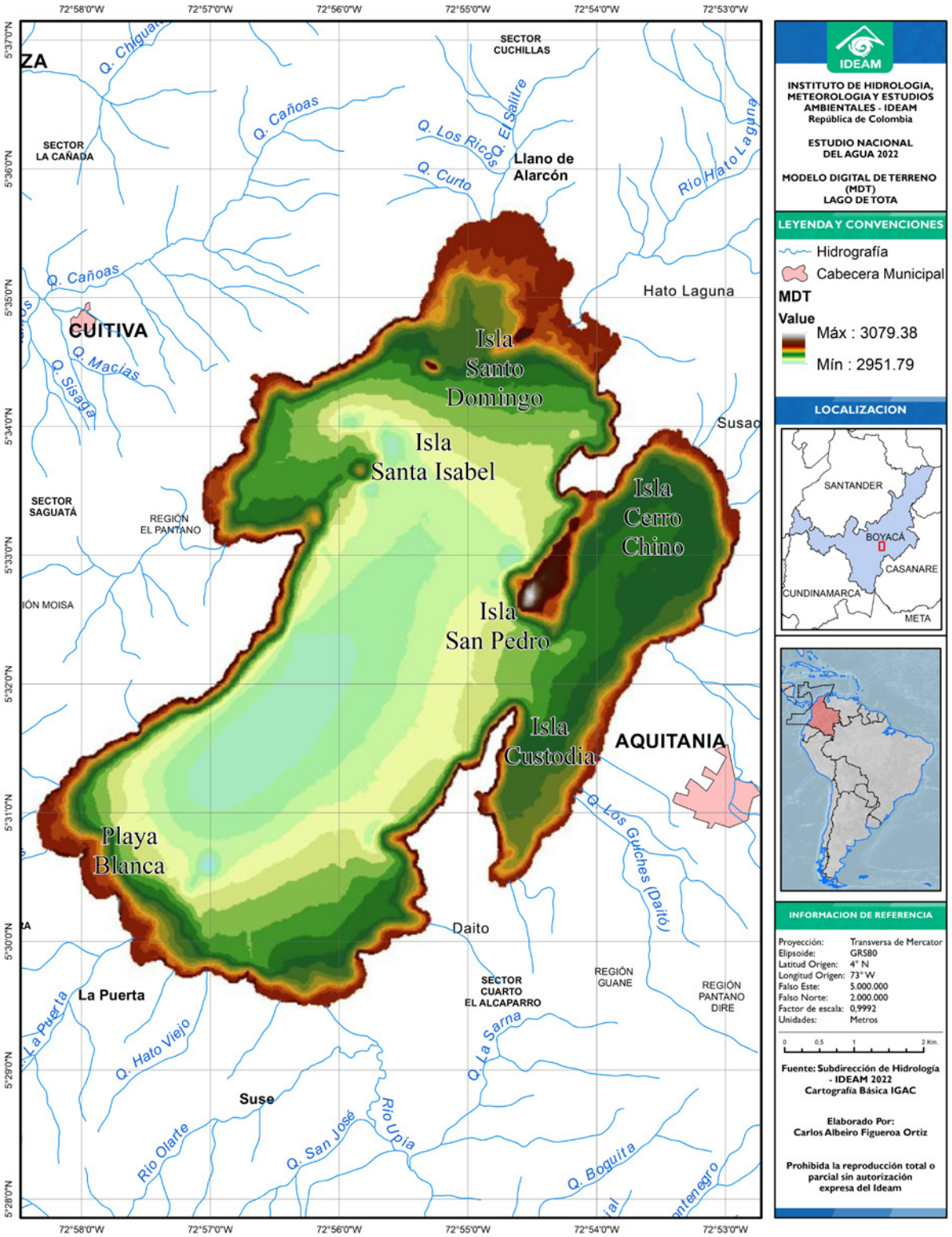



Figura 62. Topobatimetría del lago de Tota.
Fuente: Condesan e Ideam, 2020.

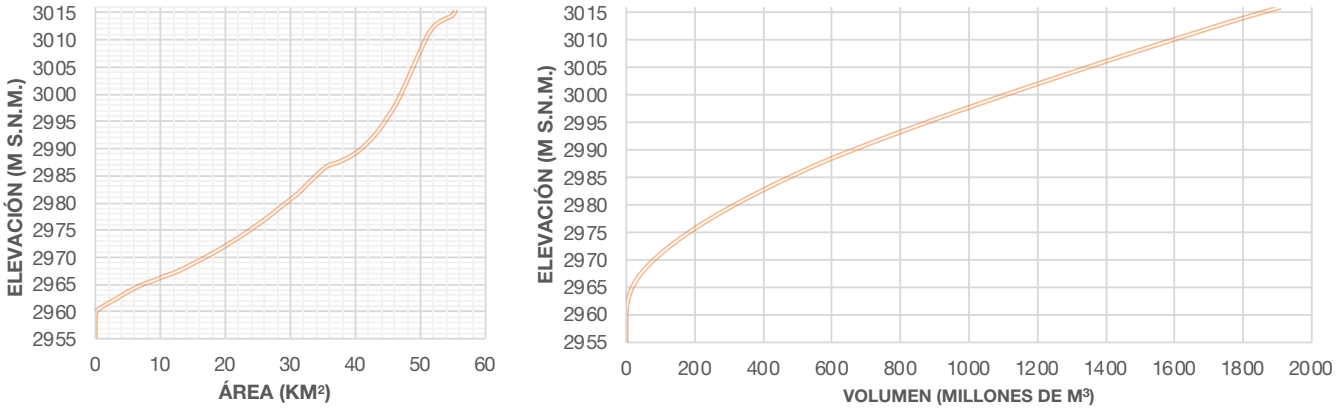



Figura 63. Curvas de capacidad del lago de Tota.
Fuente: Condesan e Ideam, 2020.

## Modelación ecohidrológica de las cuencas de las ciénagas de Zapatosa, Ayapel y del río La Vieja

El Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF, por sus siglas en inglés), junto con la administración del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y la ejecución de la organización Fundación Natura, desarrollaron del 2017 al 2022 el proyecto «Manejo sostenible y conservación de la biodiversidad acuática en la cuenca Magdalena - Cauca», con el objetivo de contribuir a la conservación y uso sostenible de ecosistemas dulceacuícolas y su biodiversidad en la cuenca del río Magdalena a través de (a) protección de hábitats prioritarios, (b) mejora de la salud de los ecosistemas y (c) fortalecimiento de la gobernanza y las capacidades locales.

Para ello, dispuso de tres componentes técnicos: el primero: «Conservación de áreas prioritarias», encargado de mejorar la representatividad e integridad ecológica de ecosistemas dulceacuícolas en la cuenca del río Magdalena. El segundo: «Gestión de la salud de los ecosistemas», responsable de contribuir al mantenimiento y salud de los ecosistemas dulceacuícolas en la cuenca del río Magdalena; una de sus misiones fue incorporar criterios para la gestión de ecosistemas dulceacuícolas en la planificación ambiental y territorial, determinando la salud de los ecosistemas con base en modelamiento hidroclimático del Ideam. Y el tercero: «Monitoreo y evaluación», para fortalecer el Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC) para el monitoreo de la salud de ecosistemas dulceacuícolas y su biodiversidad.

El proyecto y su proceso de desarrollo fueron acompañados por cuatro socios: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Fondo Adaptación, Cormagdalena e Ideam; además, contó con aliados como las CAR, la Aunap, las administraciones locales y territoriales, algunas ONG, la academia y procesos comunitarios locales, entre otros.

Para contribuir con el mantenimiento y la salud de los ecosistemas dulceacuícolas en la macrocuenca, el componente 2 (Gestión de la salud de los ecosistemas) conformó el Programa de Modelación Ecohidrológica (PMEH) que implementó metodologías integradoras de varias disciplinas del conocimiento y desarrolló una estrategia de estudio de ecosistemas de importancia territorial y nacional, a través de herramientas de modelación, para conocer el estado de deterioro o conservación de los cuerpos de agua y sus ecosistemas asociados. Esta labor se realizó con el aval y aporte técnico-científico del Ideam mediante su infraestructura física, informática, laboratorios, equipos humanos y físicos de medición de las condiciones de los cuerpos de agua, la red de estaciones, áreas operativas, protocolos de recolección y análisis de muestras de calidad físicoquímica e hidrobiológica, incorporando los principios y las metodologías de la ecohidrología

como ciencia integradora (hidrología, hidrodinámica, sedimentología, biótico y social) e innovadora, aún incipiente en el país (Figura 64).

A través del modelamiento se cuantificaron y analizaron variables hidrobiológicas que: determinan la salud de los cuerpos de agua; evalúan las amenazas vinculadas con procesos de sedimentación, alteración del régimen hídrico, cambio climático, uso de suelo y otras presiones sobre el recurso hídrico; y ayudan a comprender aspectos de la dinámica de los ecosistemas acuáticos y de las cuencas.

Todo esto contribuye a orientar y fortalecer la gobernanza y las capacidades locales en la gestión de ecosistemas dulceacuícolas y la incorporación de la salud de los ecosistemas acuáticos y la biodiversidad; orienta acciones en la macrocuenca para toma de decisiones; y apoya la gestión integral del recurso hídrico.

La modelación ecohidrológica se desarrolló en tres ventanas de estudio del país (hidrosistema, socioecosistema): en la cuenca del río Cesar (ecosistema lótico) - ciénaga de Zapatosa (ecosistema léntico); en la cuenca del río San Jorge (ecosistema lótico) ciénaga de Ayapel (ecosistema léntico); y en la cuenca del río La Vieja (ecosistema lótico).

Para cada uno de los ecosistemas lóticos se construyó un modelo hidrológico; para cada uno de los ecosistemas lénticos, un modelo biótico o trófico y un modelo hidrodinámico; y para cada una de las tres ventanas se elaboró un modelo social.

El estudio de estos hidrosistemas se realizó con tres modelos computacionales existentes (hidrológico: SWAT; hidrodinámico: Open-Telemac-Mascaret; trófico: Ecopath-Ecosim-Ewe), de código abierto, lo que facilitó ajustes y modificaciones según las necesidades y características de cada sitio. El social fue construido por el programa de modelación con base en dinámica de sistemas.

El proyecto GEF MCV (GEF Magdalena-Cauca Vive) aporta: una ruta metodológica que orienta las acciones necesarias en el desarrollo de la modelación ecohidrológica, implementada en los diez modelos desarrollados y en poder del Centro Nacional de Modelación del Ideam; la instalación

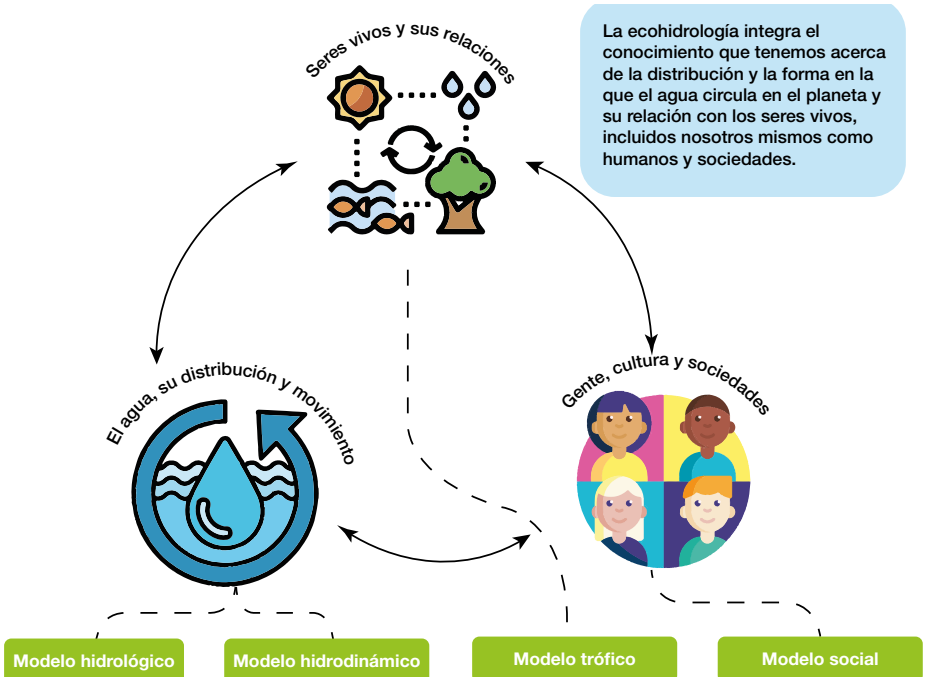



Figura 64. Esquema Programa de Modelación Ecohidrológica.
Fuente: GEF-MCV, Peña y Hernández (2022), en https://natura.org.co, 2022.

de dos estaciones limnimétricas y una automática con telemetría en río Cesar-ciénaga Zapatosa; y la construcción de un aplicativo en la página web del Ideam, donde se pueden consultar los resultados del proceso. Este proyecto también aporta la producción escrita de documentos como: (a) siete artículos científicos relacionados con cada ejercicio de modelación; (b) dos libros con el desarrollo y resultados del modelo Ecoptah en las ciénagas de Zapatosa y Ayapel; (c) documento de análisis integral de los muestreos realizados en la ciénaga de Zapatosa, y la publicación conexa de los seis catálogos de las especies registradas allí; (d) una cartilla de ecohidrología; (e) un libro técnico de modelación ecohidrológica PMEH; y (f) siete infografías, una para cada modelo desarrollado y los lineamientos.

A partir de los resultados de la modelación se hizo una propuesta de lineamientos de uso, manejo y conservación para la planificación ambiental y territorial que apoya la toma de decisiones de los actores clave de cada territorio estudiado, con enfoque al direccionamiento estratégico, uso del suelo, concertación en el ordenamiento territorial, pérdida de biodiversidad y servicios ecosistémicos, gestión del riesgo, sedimentación, pesca indiscriminada, sobrepesca, alternativas económicas con sostenibilidad financiera, y expansión de la frontera agrícola y ganadera.

Postulado por el Ideam, punto focal del Programa Hidrológico Intergubernamental (PHI) de Unesco en Colombia, a finales del 2019 se obtuvo el reconocimiento como «Sitio demostrativo de Ecohidrología» al Complejo Cenagoso Zapatosa (CCZ), ubicado en la cuenca del río Cesar (Figura 65). A partir de los resultados del modelo hidrológico río Cesar y los insumos de escenarios de cambio climático (CC) RCP 4.5 y 8.5, de usos y cobertura del suelo, se hicieron simulaciones con el modelo hidrodinámico que orientan el comportamiento futuro de la ciénaga en diversos aspectos: inundaciones (Figura 66), temperatura, fitoplancton, líneas de flujo, velocidades, profundidad y residencia de sedimentos (Figura 67), entre otros.

La transferencia del conocimiento y tecnología se hizo a través de tres diplomados virtuales para cada ventana de trabajo dirigidos a funcionarios de entidades gubernamentales, distintas ONG y procesos comunitarios. Participaron 158 personas en total, y fueron realizados por las universidades del Quindío (río La Vieja, 120 horas) y la Jorge Tadeo Lozano (ciénagas de Zapatosa y Ayapel, 100 horas).

Los estudios de modelación ecohidrológica desarrollados por el equipo del Programa de Modelación Ecohidrológica (PMEH) del proyecto GEF Magdalena - Cauca Vive se pueden conocer entrando a la página de la Fundación Natura Colombia (https://natura.org.co/minisitio-cauca-vive/lineas-de-trabajo/modelacion-ecohidrologica).

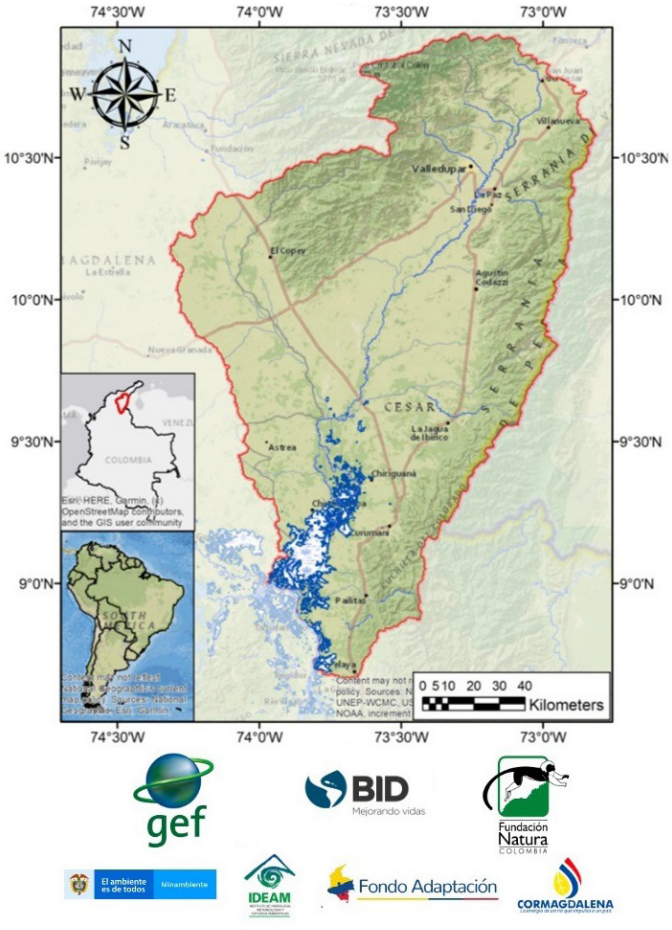



Figura 65. Sitio demostrativo de ecohidrología, PHI-Unesco, Complejo Cenagoso Zapatosa.
PMEH, 2020, en https://natura.org.co, 2022.

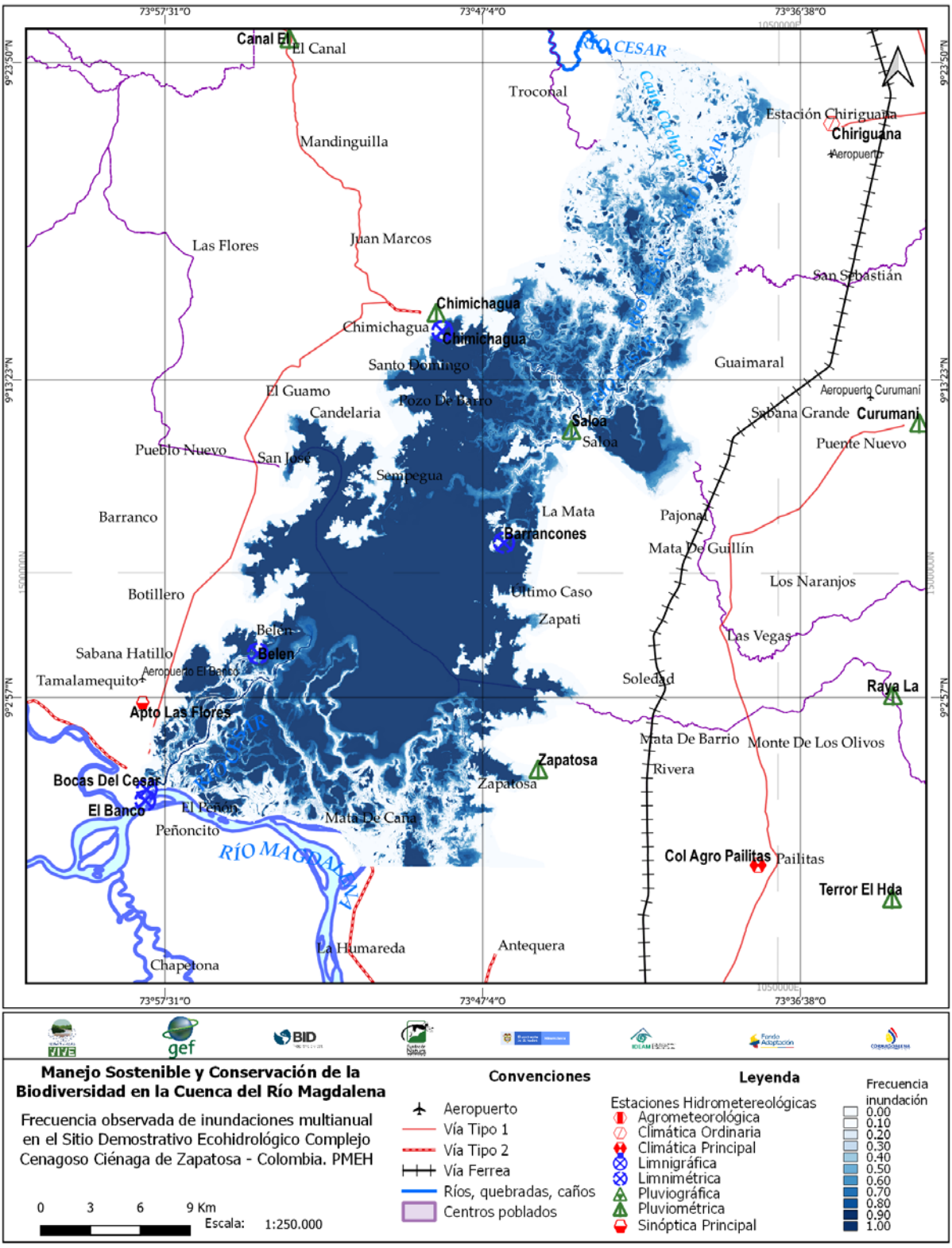



Figura 66. Comportamiento multianual de frecuencia de inundaciones en el sitio demostrativo de ecohidrología, PHI Unesco, Complejo Cenagoso Zapatosa. PMEH, 2021, en https://natura.org.co, 2022.

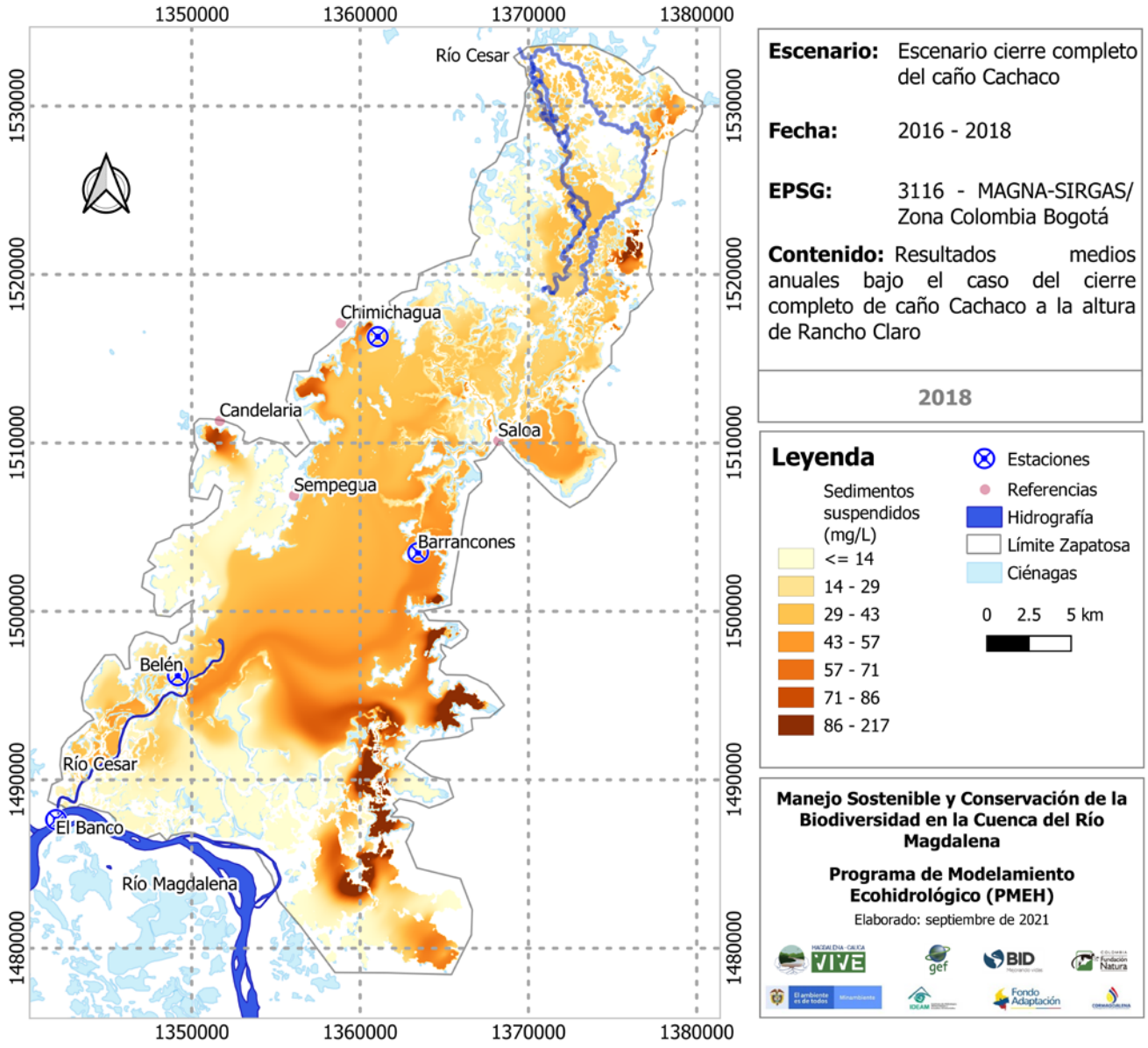



Figura 67. Comportamiento de sedimentos suspendidos, escenario cierre caño Cachaco, sitio demostrativo de ecohidrología PHI-Unesco Complejo Cenagoso Zapatosa. PMEH, 2021, en https://natura.org.co, 2022.

### 3.3.3 Consideraciones y recomendaciones sobre inundaciones y cuerpos lénticos en Colombia

Ante la magnitud y recurrencia de eventos extremos de origen hidrometeorológico en el territorio nacional, se requiere dar prioridad a la generación de conocimiento soportado en mediciones sistemáticas de las condiciones de flujo en los sistemas hidrológicos. También es preciso consolidar insumos como los levantamientos topobatimétricos de alta resolución o las tecnologías de captura de datos Lidar aerotransportados o con drones para fortalecer el conjunto de datos necesarios para la aplicación continua de herramientas de modelación hidrológica e hidráulica en los tramos de río priorizados.

Otro aspecto importante corresponde al necesario fortalecimiento de personal técnico especializado que permita analizar en forma oportuna los datos recopilados y garantice la generación continua de productos de modelación matemática de procesos hidrológicos, con énfasis en la caracterización de la amenaza de inundación, en la cual se incluyan escenarios probabilísticos de la ocurrencia de este tipo de procesos de inundación en el país.

Lo anterior concuerda con la necesaria articulación con la propuesta de realizar un ordenamiento del territorio alrededor del agua, con miras a la construcción de herramientas de planificación a partir del ciclo hidrológico que permitan a la sociedad establecer y diseñar medidas de adaptación, prevención y mitigación de los efectos adversos que puedan ser ocasionados como resultado de la indebida ocupación de áreas propensas a fenómenos de inundación.

En vista del continuo cambio de coberturas, presiones antrópicas, intervención de zonas de recarga, modificación de condiciones hidráulicas, entre otras acciones, se requiere propender por la implementación de instrumentos de seguimiento y caracterización continua de los territorios vulnerables ante eventos de inundación, conocer sus eventuales impactos y gestionar el riesgo. Esto permitirá la definición de acciones oportunas de adaptación y estrategias de control y mitigación de los potenciales impactos ante eventos recurrentes, propios de la dinámica de los sistemas hídricos.

Establecer el estado del arte en el conocimiento de los servicios ecosistémicos brindados por los ecosistemas de ambientes acuáticos en Colombia (en especial, los ecosistemas asociados con los cuerpos de agua lénticos) se convierte en una imperiosa necesidad en un territorio con una alta vulnerabilidad ambiental y social, y que se encuentra en continuo desarrollo.

Para que se logre una mejor cuantificación del cambio real que han venido sufriendo las zonas potencialmente inundables a través del tiempo —ya sea de manera natural o debido a actividades antrópicas relacionadas con procesos graduales en el cambio del uso del suelo—, es necesario contar con los insumos actualizados para tal fin, como lo son los mapas de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia y el de Coberturas de la Tierra, el cual, a su vez, es insumo fundamental del mapa de ecosistemas, ya que, como se mencionó en parágrafos anteriores en este estudio, se asumió que las ZPI no presentaron perturbaciones durante el paso del tiempo, lo cual claramente aumenta la incertidumbre y especulación sobre las dinámicas en estas áreas.

## 3.4 Evolución y dinámica de los glaciares y su relación con la alta montaña

Los glaciares y, en general, la criosfera están ofreciendo señales claras del ritmo del actual cambio climático. En muchos países se realiza un seguimiento a los glaciares para comprender tanto dicho ritmo como la dinámica hídrica de las montañas donde el sistema glaciar hace importantes aportes. Aquí se presenta el estado actual y la tendencia de los glaciares nacionales mediante dos indicadores ambientales usados globalmente: el balance de masa glaciar y el área glaciar; el primero refleja las pérdidas o las ganancias de masa que se relacionan con el comportamiento de la tropósfera y con las condiciones físicas locales; y el segundo, establece el ritmo al cual mengua esta cobertura. Se complementa la información con las relaciones hídricas del sistema glaciar con los demás ecosistemas de la alta montaña colombiana: páramo y bosque altoandino.

Los años 2021 y 2022 estuvieron marcados por incrementos de las precipitaciones por encima de lo normal en la región andina colombiana que impactaron las altas montañas. Durante estos años, se registraron indicadores moderados de valores que, según los boletines de seguimiento al ciclo ENSO (El Niño oscilación del sur) del Ideam, se interpretan como condiciones del fenómeno climático extremo La Niña, fenómeno de variabilidad climática que impactó los nevados con mayor precipitación y acumulación de nieve y granizo y, por ende, una ligera reducción en las pérdidas de masa glaciar.

### 3.4.1 Aspectos conceptuales y metodológicos

Los glaciares colombianos, por su localización en el planeta, pertenecen a la clasificación de glaciares tropicales y, específicamente, ecuatoriales, por su particular sensibilidad a la dinámica de la atmósfera baja (tropósfera) y a su respuesta a la dinámica del clima regional, como es el desplazamiento intraanual de la zona de confluencia intertropical (ZCIT) y a fenómenos extremos de variabilidad climática interanuales como el ENSO. En la actualidad, existen en Colombia seis glaciares: dos sierras nevadas (El Cocuy o Güicán y Santa Marta) y cuatro volcanes nevados (Huila, Tolima, Santa Isabel y Ruiz), con un límite inferior del hielo a 4800 metros de altitud, aproximadamente, y cuya característica particular es la fragmentación que aumenta la exposición a la atmósfera y con ello un incremento en el derretimiento. A modo de comparación y a la misma escala espacial, la Figura 68 muestra estas masas de hielo fraccionadas.

Desde hace 16 años, el Ideam monitorea directa y periódicamente dos glaciares con diferentes condiciones físicas: el volcán nevado Santa Isabel (cordillera Central) y la Sierra Nevada El Cocuy o Güicán (cordillera Oriental); el primero, con frecuencia mensual; y el segundo, bimestralmente; para ello aplica el método directo usado internacionalmente que es la estimación del balance de masa. En los otros cuatro glaciares (además de en los dos anteriores), se realiza un seguimiento bienal al cambio de área mediante el uso de imágenes satelitales. En paralelo, una red de estaciones hidroclimatológicas alrededor de algunos nevados (Ruiz, Santa Isabel, Tolima y El Cocuy) captura datos para relacionar la dinámica glaciar con el clima y la hidrología.

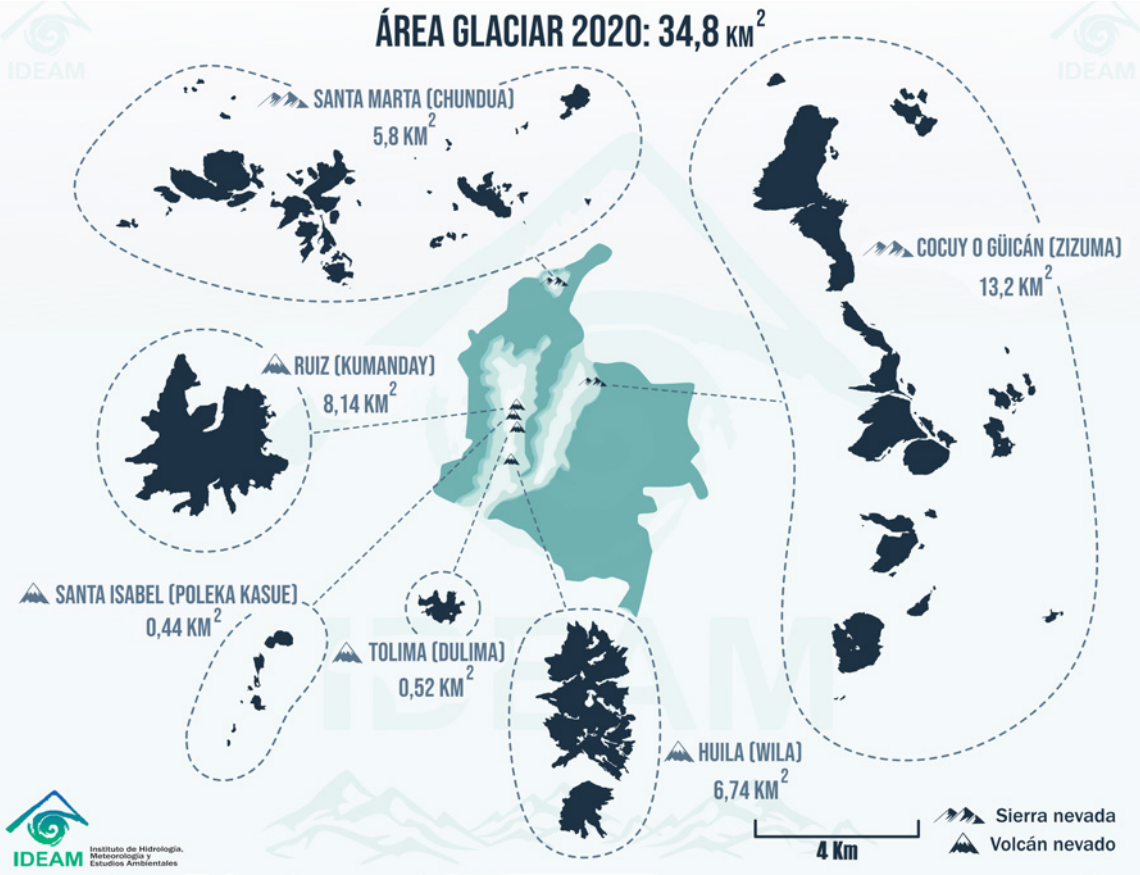



Figura 68. Glaciares actuales en Colombia y su fragmentación.

### 3.4.2 Evolución del área glaciar en Colombia

El área glaciar colombiana (2021) es de 33,9 +/-0,82 km². Desde finales de la Pequeña Edad de Hielo (mediados del siglo XIX, aprox.), y según registros documentales históricos, fotografías de terreno, fotografías aéreas e imágenes de satélite, la cobertura glaciar en Colombia ha disminuido en forma progresiva y se han extinguido ocho pequeños glaciares durante el siglo XX. Durante los últimos 170 años, el área glaciar colombiana se redujo un 90 % y, en la última década (2010-2020), un 26 % (Tabla 28 y Figura 69). Según el seguimiento a esa reducción, desde la década de los años noventa ese ritmo promedio ha sido del 3 % al 5 % anual; pero entre 2017 y 2021, se destaca que la reducción del área glaciar colombiana fue de 7,8 % (2,85 km²). De persistir esta tendencia es probable que, a finales de este siglo, los glaciares colombianos estén completamente extintos o bastante disminuidos (Rabatel et al., 2018).

Esta tendencia ha sido diferencial para cada glaciar según la altitud, tamaño, exposición a la radiación solar, y condiciones climáticas y físicas locales. De hecho, para el glaciar Santa Isabel (Figura 70), que es el de menor altitud y tamaño, por su contenido de ceniza volcánica —que acelera la fusión del hielo— y tendencia a la disminución de precipitaciones sólidas, se prevé su extinción total durante la presente década (Ideam, 2021). Entre 2017 y 2021 fue el glaciar con el mayor ritmo de derretimiento (se destaca para este glaciar que, a inicios de 2022, se extinguieron los dos últimos relictos de hielo que drenaban hacia la cuenca del río Otún). Por el contrario, desde 2017, la Sierra Nevada El Cocuy o Güicán registra una relativa estabilidad, incluso con ganancias de masa, situación atribuida tanto a condiciones climáticas locales como a su mayor tamaño y altitud. Para el periodo 2021 y 2022, la reducción de área persistió, aunque con un ritmo ligeramente menor debido a la influencia de La Niña, que incrementó las precipitaciones sólidas.

Tabla 28. Evolución de la cobertura glaciar en Colombia.

| Periodo | Sierra nevada de Santa Marta (Chundua) Área (km²) | Sierra nevada El Cocuy o Güicán (Zizuma) Área (km²) | Volcán nevado del Ruiz (Kumanday) Área (km²) | Volcán nevado Santa Isabel (Poleka Kasue) Área (km²) | Volcán nevado del Tolima (Dulima) Área (km²) | Volcán nevado del Huila (Wila) Área (km²) | Total Colombia Área (km²) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ±1850 | 82,6 | 148,7 | 47,5 | 27,8 | 8,6 | 33,7 | 349 |
| *1950-59 | 19,4 | 38,9 | 21,0 | 9,4 | 2,7 | 17,5 | 109 |
| *1980-89 | 14,1 | 35,7 | 17,9 | 6,4 | 1,6 | 15,4 | 91 |
| *1990-99 | 11,1 | 23,7 | 12,9 | 5,3 | 1,2 | 13,6 | 68 |
| 2010 | 8,2 | 16,5 | 10,3 | 1,9 | 0,8 | 9,7 | 47 |
| 2016 | 7,10 | 14,35 | 9,26 | 1,0 | 0,63 | 7,72 | 40 |
| 2017 | 6,54 | 13,75 | 8,88 | 0,7 | 0,59 | 7,37 | 36,7 |
| 2019 | 6,22 | 13,46 | 8,39 | 0,5 | 0,55 | 7,13 | 36,3 |
| 2020 | 5,81 | 13,19 | 8,14 | 0,45 | 0,52 | 6,74 | 34,9 |
| 2021 | 5,53 | 12,99 | 7,96 | 0,35 | 0,50 | 6,52 | 33,9 |

*Nota: datos correspondientes a distintos años dentro de la década señalada para cada glaciar.

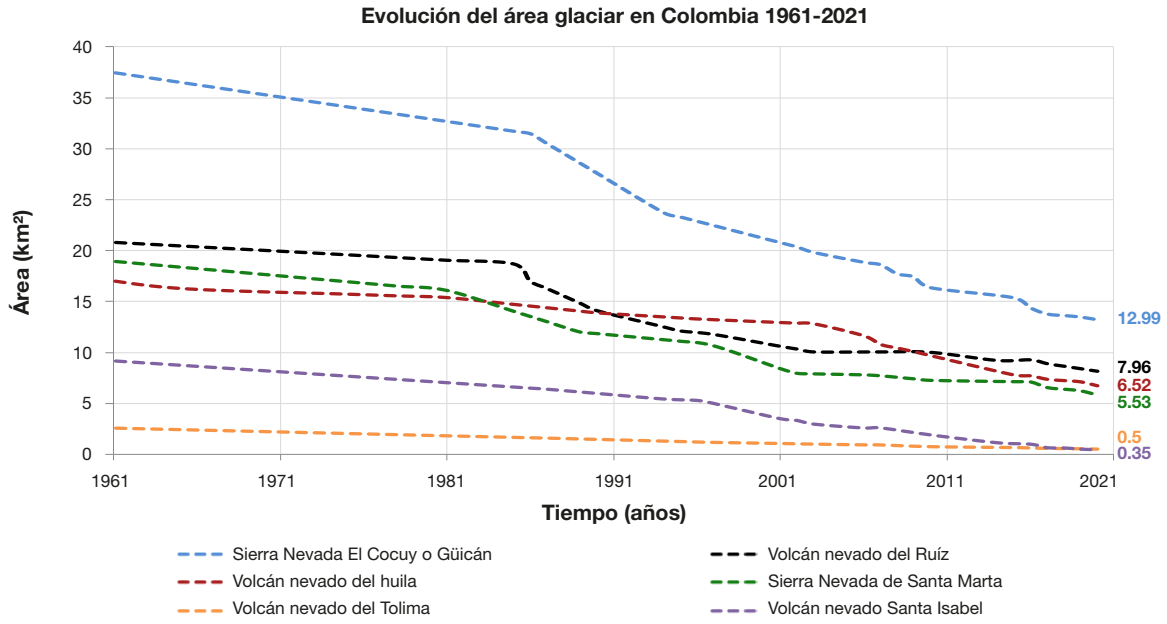



Figura 69. Evolución de la cobertura glaciar en Colombia en las últimas seis décadas.



Figura 70. Glaciar Santa Isabel, sector Conejeras. Comparación entre 2010 (arriba) y 2022 (abajo).

Así como el seguimiento a la reducción del área glaciar constituye un indicador ambiental sobre la tendencia del cambio climático global y regional, medir y estudiar en terreno el comportamiento de los dos primeros metros de la superficie de un glaciar —que es la parte más sensible a la dinámica de baja troposfera-—resulta ser un excelente segundo indicador ambiental, necesario para comprender mejor la relación clima-glaciar y con ello la sensibilidad climática de la alta montaña. En el planeta, este indicador es conocido como *balance de masa glaciar* y, de manera coloquial, puede decirse que representa el estado de salud de un glaciar. Es posible calcularlo directa o indirectamente mediante mediciones periódicas. En Colombia se practica desde 2006 de manera directa (en terreno); a continuación se presentan los resultados.

### 3.4.3 Balance de masa glaciar

Este indicador ambiental, que expresa las pérdidas o ganancias de masa de un glaciar durante un lapso de tiempo y con base en datos en terreno, es calculado para dos glaciares colombianos que manifiestan comportamientos disímiles. Por un lado, el balance de masa del glaciar Santa Isabel (Figura 71) continúa mostrando un total desequilibrio con el clima, con pérdidas continuas de masa desde marzo de 2006 a noviembre de 2022; un total de 55 metros equivalentes de agua (m e.a.), una cifra muy por encima del valor mundial (-24 m e.a. desde mediados de la década de 1970 para un conjunto de glaciares de referencia global). Durante el periodo de enero de 2018 a noviembre de 2022, el balance de masa fue de 17,7 m e.a. De acuerdo con las observaciones y registros del Ideam, su derretimiento se ha visto principalmente influenciado por su baja altitud, contenido de ceniza volcánica (menor albedo) y escasa precipitación sólida (Figura 73).

Caso diferente muestra el balance de masa en la Sierra Nevada El Cocuy o Güicán, sector Ritacuba Blanco (Figura 72), en donde el acumulado desde enero de 2009 a octubre de 2022 es de 1,0 m e.a.; y para el periodo de febrero de 2018 a octubre de 2022 fue de +1,8 m e.a. De hecho, desde 2017 (excepto en 2020, cuando no fue posible realizar mediciones en terreno en este glaciar debido al aislamiento sanitario) se han evidenciado balances de masa anuales positivos, los cuales se podrían atribuir a condicionamientos geográficos y climáticos locales, tales como mayores altitudes de las masas glaciares y viento cargado de humedad provenientes de la cuenca del Orinoco que se condensa generando precipitaciones sólidas en las partes altas de la cordillera; al respecto, no se cuenta con información del comportamiento climático en esta vertiente oriental de la cordillera Oriental.

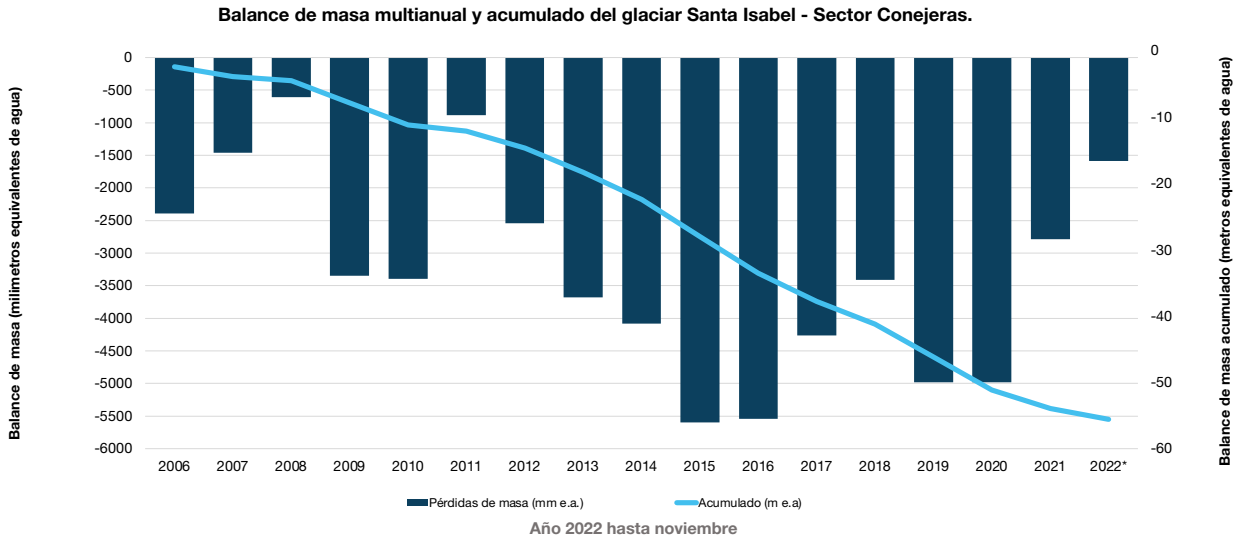



Figura 71. Balance de masa multianual del glaciar Santa Isabel, sector Conejeras.

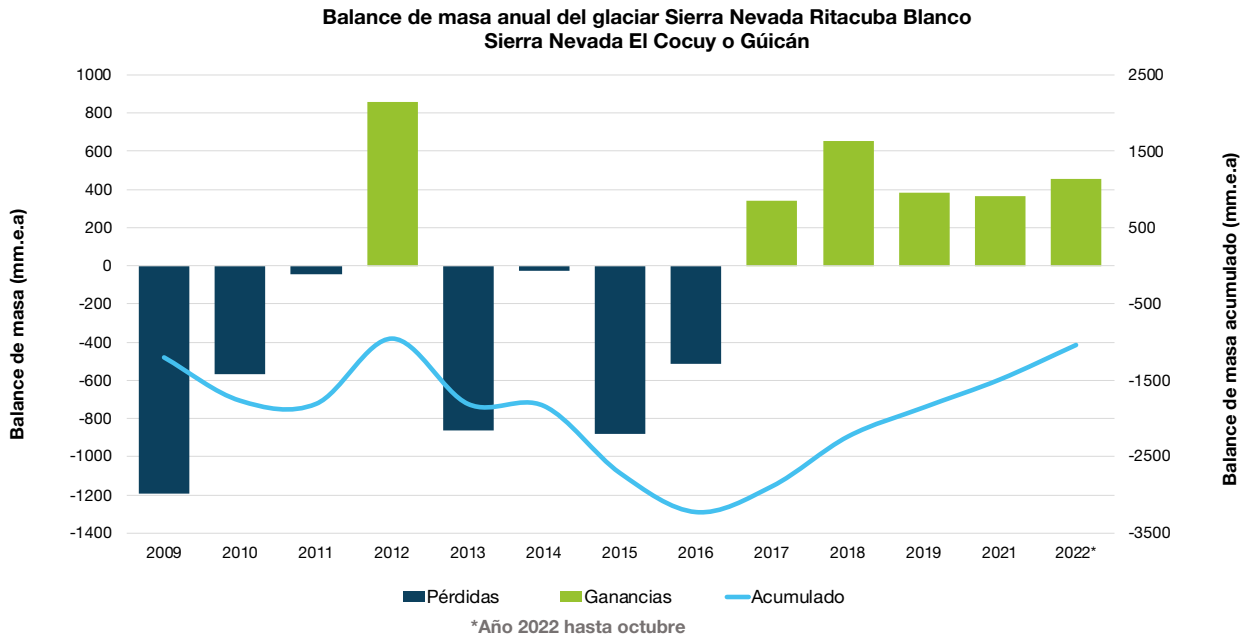



Figura 72. Balance de masa multianual de la Sierra Nevada El Cocuy o Güicán, sector Ritacuba Blanco.

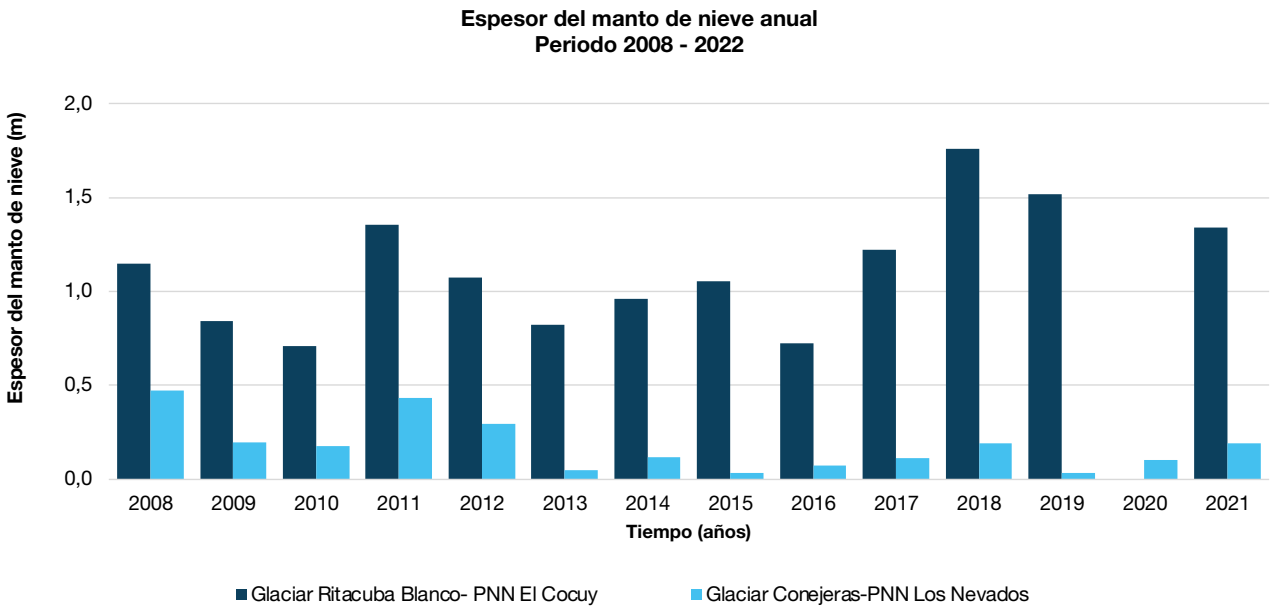



Figura 73. Espesor del manto de nieve anual. Periodo 2008 al 2022 en los glaciares Ritacuba Blanco, del Parque Nacional Natural El Cocuy, y Conejeras, ubicado en el Parque Nacional Natural Los Nevados.

La alta montaña colombiana —con sus tres ecosistemas integrados: glaciar, páramo y bosque altoandino— resulta fundamental para el aporte de agua a la población. El agua de derretimiento glaciar no es un aporte significativo comparado con las cantidades que se originan, almacenan y drenan en el páramo y el bosque altoandino, además de la reducida cobertura glaciar respecto a los otros dos ecosistemas. En este sentido, y dado que es un sistema integrado, es necesario comprender la dinámica del sistema hídrico de la alta montaña y sus interrelaciones, por lo menos cuantitativas, entre el glaciar, el páramo y el bosque altoandino, lo cual se arguye enseguida.

### 3.4.4 Relaciones hídricas del sistema glaciar con los ecosistemas de la alta montaña

Los aportes hídricos líquidos de los glaciares colombianos están directamente relacionados con las variaciones de área y volumen del hielo, a su vez influenciados por los procesos atmosféricos como la dinámica de la ZCIT y los fenómenos de variabilidad climática tipo ENSO.

Las redes hidrométricas del Ideam localizadas en entornos de alta montaña indican un predominio de aportes hídricos del bosque altoandino y del páramo, y en mucho menor cuantía del glaciar, el cual incrementa su contribución en temporadas secas debido al aumento de la fusión glaciar (por el incremento, a su vez, de la temperatura y la exposición a la radiación solar). Los caudales de fusión glaciar son objeto de reciente estudio; un análisis de los datos de la estación hidrométrica en el borde del glaciar Santa Isabel, sector Conejeras (glaciar en próxima extinción), y que opera desde 2008, indica que su punto máximo de aporte líquido ocurrió durante el último fenómeno climático extremo de El Niño en 2015-2016, intensificado por la ceniza volcánica acumulada sobre su superficie; después de este evento, el aporte ha mostrado una tendencia a la disminución como respuesta a la fuerte reducción de área y volumen (Morán et al., 2018) (Figura 74).

Los aportes de agua líquida de un glaciar colombiano a la alta montaña son relativamente pocos dada la baja cobertura de hielo en una cuenca de alta montaña, los cuales se estiman entre 3 % a 5 % (Ideam, 2012). A pesar de que la red hidrométrica a gran altitud (>3000 m) no es densa en el territorio, se tienen dos redes especializadas localizadas alrededor del glaciar Santa Isabel y la Sierra Nevada El Cocuy o Güicán como modelos de estudio. La Figura 75 muestra los aportes de los tres ecosistemas de la alta montaña en la cuenca del río Claro (área 71 km², Villamaría, Caldas), en la que se destacan tanto los caudales del bosque altoandino —cuenca sin ecosistema de páramo y área 0,92 km²— como los del páramo —sin cobertura glaciar y área 4,5 km²—, así como la influencia de los fenómenos de variabilidad climática tipo El Niño (2015-2016) y La Niña (2010-2011).

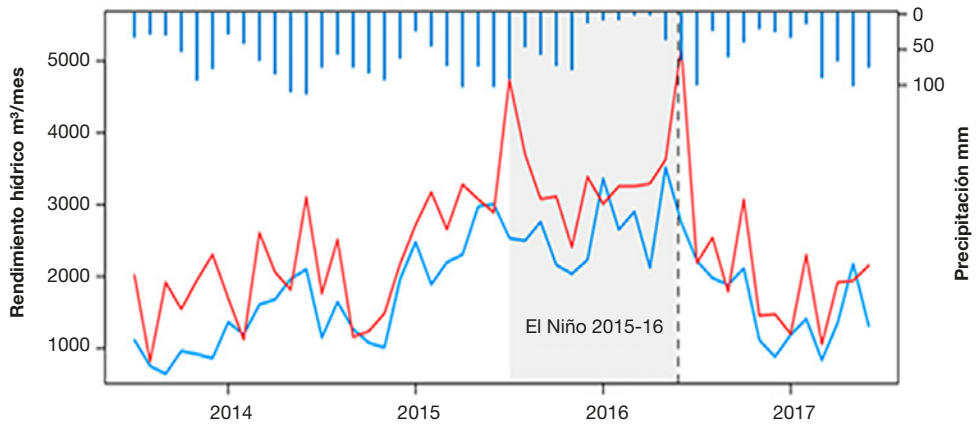



Figura 74. Rendimiento hídrico medio mensual (Q) para días con temperatura inferior a 2 °C (azul) y días con temperatura superior a 2 °C (rojo). Indicación del evento El Niño 2015-2016 (sombreado gris), punto de quiebre en evolución de la producción de agua (línea discontinua) y precipitación mensual (barras azules). Fuente: (Morán et al., 2018). Datos de la estación hidrométrica Conejeras-2 Ideam, 4700 m s. n. m.

En el caso de la Sierra Nevada El Cocuy o Güicán, el Ideam igualmente dispone de tres estaciones hidrométricas, una en cada ecosistema; y los comportamientos son similares en cuanto al predominio de aportes del páramo y del bosque altoandino. La Figura 76 muestra el comportamiento para esta zona de alta montaña del país.

Tanto en la alta montaña de Caldas como en Boyacá es evidente la estacionalidad intraanual relacionada con los ciclos de temporadas secas y húmedas que se reflejan en la dinámica de los caudales, pero con diferencias asociadas a su localización geográfica como la influencia de la humedad proveniente del Pacífico para el caso de la cuenca de río Claro, la influencia de la humedad de la cuenca del Orinoco y la sequedad de la cuenca del río Chicamocha para la cuenca del río Cardenillo. La Tabla 29 resume las cuantías hídricas de cada ecosistema para estas dos cuencas de alta montaña según su área aportante y periodo de observación.

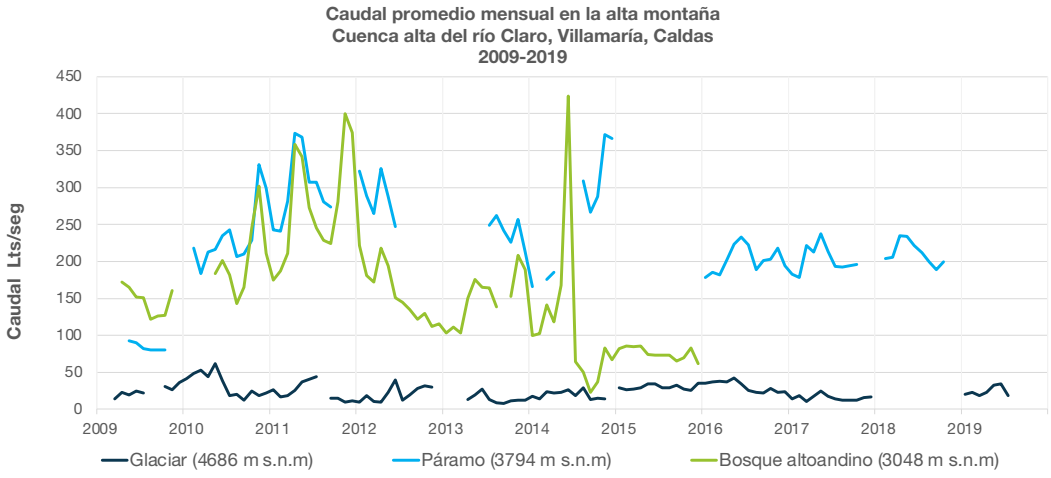



Figura 75. Caudal promedio en los ecosistemas de alta montaña. Caso cuenca río Claro.
Fuente: Ideam.

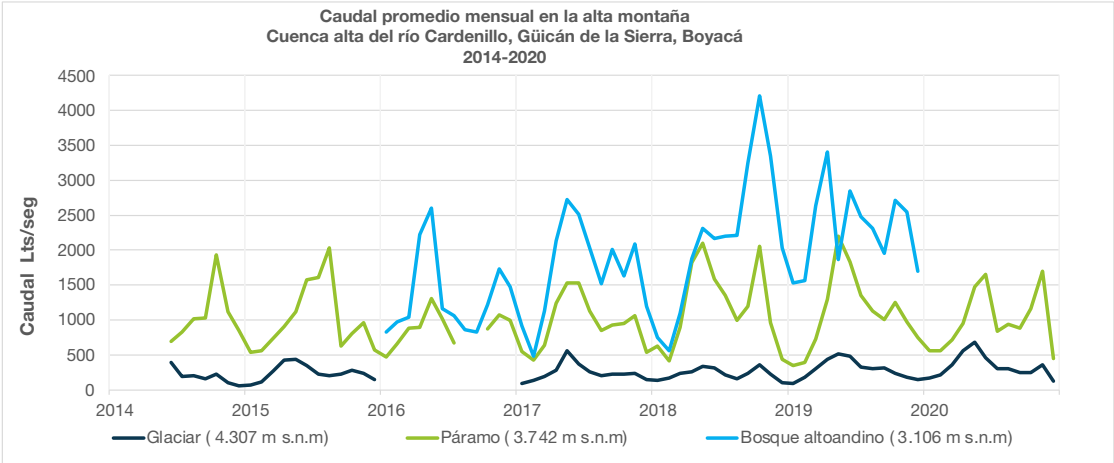



Figura 76. Caudal promedio en los ecosistemas de alta montaña. Caso cuenca del río Cardenillo, Güicán de la Sierra, Boyacá. El caudal de cada ecosistema incluye el (los) del ecosistema inmediatamente superior.
Fuente: Ideam.

Con base en la información que suministran las figuras 75 y 76, es indudable que el suministro de agua líquida del sistema glaciar es poco comparado con lo que aportan el páramo y el bosque altoandino, pero no resta importancia en la dinámica en la alta montaña en cuanto a su naturaleza de indicador de cambio climático. Las figuras también expresan el relativo predominio de los aportes cuantitativos de agua del bosque altoandino sobre el páramo en razón al rango altitudinal del bosque que coincide con los frentes de condensación atmosférico que dan origen a mayores precipitaciones comparadas con el páramo. A su vez, esa diferenciación hídrica está condicionada por el relieve, humedades y suelos que regulan el flujo del agua. A pesar de que aquí se presentan tan solo dos casos de estudio, se vislumbra que, dada la complejidad biofísica de la alta montaña colombiana, su dinámica hídrica debe variar geográficamente.

Tabla 29. Cuantías hídricas de cada ecosistema de alta montaña. Cuenca del río Claro (Villamaría, Caldas) y cuenca del río Cardenillo (Güicán de la Sierra, Boyacá).

| Cuenca río Claro 71 km², Villamaría, Caldas | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Ecosistema de alta montaña** | **Caudal promedio Lts/seg** | **Área de la cuenca (km²)** | **Periodo de referencia** | **Observación** |
| Glaciar | 22,35 | 0,26 | 2009-2022 | |
| Páramo | 226 | 4,5 | 2009-2018 | Cuenca sin aporte hídrico del glaciar |
| Bosque altoandino | 159 | 0,92 | 2009-2015 | Cuenca sin aparte hídrico del páramo y del glaciar |

| Cuenca río Cardenillo 46,3 km². Güicán, Boyacá | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Ecosistema de alta montaña** | **Caudal promedio Lts/seg** | **Área de la cuenca (km²)** | **Periodo de referencia** | **Observación** |
| Glaciar | 261 | 2,7 | 2014-2020 | |
| Páramo | 1030 | 24,3 | 2014-2020 | Incluye el caudal que aporta el glaciar |
| Bosque altoandino | 1874 | 19,3 | 2016-2019 | Incluye el caudal que aportan el glaciar y el páramo |

Fuente: Ideam.

### 3.4.5. Conclusiones acerca de la dinámica glaciar e hídrica altoandina

De persistir la actual tendencia de reducción del área glaciar colombiana es posible que, a finales del presente siglo, esté muy reducida esta cobertura en los glaciares más extensos y de mayor altitud, y extintos los más pequeños y de baja altitud. Esto dependerá tanto de la intensidad del clima global como de las condiciones regionales y locales, la altitud, la topografía, la exposición a la radiación solar, la actividad volcánica, el clima (precipitación y temperatura principalmente) y la variabilidad climática (ENSO).

El balance de masa glaciar para los dos casos colombianos pone de manifiesto los condicionantes físicos locales en la evolución glaciar en Colombia. Por un lado, la Sierra Nevada El Cocuy o Güicán presenta una estabilidad desde 2017, con ganancias de masa resultado de intensas precipitaciones de nieve con influencia de la cuenca del Orinoco. El segundo caso, el glaciar Santa Isabel, presenta un desequilibrio con el clima actual, y su extinción ocurriría durante los próximos 10 años.

Dada la importancia del sistema glaciar colombiano como indicador de cambio climático en la zona ecuatorial, así como la dinámica hídrica en la alta montaña colombiana que aporta gran parte del agua que demanda la población, es preciso mantener y expandir los sistemas y redes de monitoreo, dada la diversidad geográfica de la alta montaña, con el fin de comprender las relaciones hídricas, más que todo entre el páramo y el bosque altoandino.



Crédito:
Juan José Montoya Monsalve
Cuenca del río Patia - parte media

# ESTADO DEL CONOCIMIENTO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN COLOMBIA

**Autores:**

**IDEAM:**
Emilio Andrés Gómez García
Nelson Omar Vargas Martínez

**Con la colaboración de:**
Brayan Steven Benavides Bello
Pasante de la Universidad
Nacional de Colombia

CAPÍTULO 4

# 4. Estado del conocimiento de las aguas subterráneas en Colombia

El agua subterránea fluye a través de los materiales porosos saturados del subsuelo hacia niveles más bajos que los de infiltración, y puede volver a surgir naturalmente como manantiales y caudal de base de los ríos. De esta manera, el agua subterránea representa una fracción importante de la masa de agua presente en cada momento en los continentes, y que está almacenada en acuíferos ubicados a diferentes niveles de profundidad y en sistemas confinados que se ubican varios kilómetros por debajo de la superficie. Se pueden encontrar aguas subterráneas en casi cualquier lugar, bien se trate de zonas húmedas, áridas o semiáridas (Ordoñez Gálvez, 2011). Puede ser extraída a través de pozos, aljibes o manantiales, a los que se denominan *puntos de agua* en los inventarios que deben realizarse para conocer el uso y aprovechamiento de estos cuerpos o masas de agua.

En este documento se presenta una síntesis del estado actual del monitoreo de las aguas subterráneas a nivel regional que corresponde a resultados y avances de redes de monitoreo implementadas por algunas autoridades ambientales. Además, se consolida un nuevo inventario de puntos de aguas subterráneas a escala nacional (actualizando información presentada en los ENA 2014 y 2018 con inventarios regionales, locales y de registros de bases de datos de autoridades ambientales, principalmente). A lo anterior, se suma la actualización de los usos y volúmenes del agua concesionada y captada a nivel nacional mediante los registros de la tasa por utilización de agua (TUA) para los años 2016 a 2021, aportados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) y basados en la información reportada por autoridades ambientales.

El capítulo se construyó en su totalidad con base en información secundaria proveniente de estudios regionales y locales publicados a la fecha por las autoridades ambientales y diversas instituciones del orden nacional como el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (MVCT); la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (Anla), el Servicio Geológico Colombiano (SGC), Ecopetrol, el Ideam y las universidades.

## 4.1 Aspectos conceptuales

En este apartado se describen algunos de los conceptos utilizados en la consolidación del capítulo, los cuales fueron utilizados para el análisis y la presentación de los resultados.

### 4.1.1 Modelos hidrogeológicos conceptuales

El conocimiento de las aguas subterráneas —que debe preceder a las actividades de monitoreo, evaluación y gestión de las aguas subterráneas— se consolida e integra en el modelo hidrogeológico conceptual (MHC) de los sistemas acuíferos. Este modelo está conformado por: (a) el *modelo geológico*, que describe la geometría de los sistemas acuíferos y las características litológicas y estructurales que determinan la definición de unidades hidrogeológicas, y su potencialidad de almacenamiento y flujo de las aguas subterráneas de acuerdo con las condiciones de porosidad, permeabilidad y continuidad de las unidades de roca sedimento; (b) el *modelo hidrológico*, que determina la dinámica de flujo, los mecanismos y la cuantificación de recarga, inventario de puntos de agua, balance hídrico, conexiones hidráulicas de aguas superficiales y subterráneas; (c) el *modelo hidráulico*, que permite reconocer las propiedades de permeabilidad o conductividad hidráulica, transmisividad y coeficiente de almacenamiento de unidades acuíferas; (d) el *modelo hidroquímico*, que permite reconocer el «fondo hidrogeoquímico» o distribución espaciotemporal de las propiedades fisicoquímicas y concentraciones de las especies químicas disueltas en el agua bajo condiciones naturales, y su afectación por actividades antrópicas; y, finalmente, (e) el *modelo isotópico*, que brinda información sobre fuentes, edades, tiempos de viaje y trayectos de flujo del agua subterránea.

El MHC se debe alimentar de manera continua con el monitoreo permanente y sistemático de las aguas subterráneas que se realiza a través de pozos o piezómetros que permiten acceder a las unidades acuíferas en el subsuelo.

### 4.1.2 Importancia de las redes de monitoreo, información y evaluación para la gestión del recurso hídrico subterráneo en Colombia

El conocimiento de los procesos naturales e interacciones que se desarrollan en los componentes del ciclo hidrológico requieren de una medición continua en el tiempo y en el espacio, con acciones de monitoreo sistemático y permanente soportados en principios y métodos científicos. De esta manera, el monitoreo se constituye en herramienta esencial para conocer los procesos e interacciones del agua subterránea en el ciclo hidrológico.

El diseño de redes de monitoreo de aguas subterráneas eficientes parte de la necesidad de tener una información completa y oportuna de los sistemas acuíferos que responda a objetivos de diferente nivel para la toma de decisiones. Una vez satisfecha esta aproximación estratégica, se deben definir las variables, frecuencias de monitoreo, protocolos, procedimientos y requerimientos para un adecuado flujo de la información de este modo, se proporcionará un valor agregado a los datos obtenidos en los puntos de información, para que, además, se garantice la calidad de los datos y la difusión de estos a los diferentes usuarios gremiales, sociales e institucionales. Finalmente, es importante definir la tecnología de los instrumentos y las condiciones de transmisión de los datos según las necesidades establecidas en los objetivos o propósitos del monitoreo. Todos estos aspectos deben formar parte de la documentación de los programas institucionales regionales de monitoreo que deben tener las autoridades ambientales, en el marco del Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico (PNMRH) y el Programa Nacional de Aguas Subterráneas (PNASUB), derivados de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico expedida por el MADS en 2010.

Este capítulo ofrece información detallada de las diferentes redes de monitoreo implementadas por algunas autoridades ambientales del país; se exponen datos como nombres de las redes, entidades que las manejan, alcance, objetivos, variables y frecuencias de monitoreo, e información específica de los puntos que las conforman, entre otros.

### 4.1.3 Monitoreo de aguas subterráneas en Colombia a escalas nacional, regional y local

A nivel general, el monitoreo del recurso hídrico subterráneo debe ser entendido como un programa diseñado científicamente para que —de manera sistemática, periódica y con propósitos definidos— permita observar, medir, muestrear y analizar distintas variables físicas, químicas y biológicas del agua subterránea mediante metodologías y técnicas normalizadas; esto con el fin de realizar un seguimiento del progreso del programa, o de un hecho en particular, a favor de la consecución de sus objetivos y la orientación para la toma de decisiones de gestión (Ideam e Invemar, 2021).

Las redes de monitoreo de agua subterránea se clasifican jerárquicamente en tres niveles: redes nacionales, redes regionales, y las redes locales o específicas. En la Figura 77 se ilustran sus ámbitos de intervención y las competencias institucionales de cada nivel (Ideam, 2015).

Específicamente, el diseño de redes de monitoreo de agua subterránea consiste en la selección de puntos como pozos de observación (piezómetros), pozos abandonados adecuados para monitoreo, pozos de producción, aljibes o manantiales, a través de los cuales se establece un programa de supervisión continua para medir niveles y tomar muestras de agua para el análisis de la calidad mediante variables físicas, químicas y biológicas establecidas con anterioridad.

A *escala nacional*, el monitoreo de aguas subterráneas se configura como un sistema de monitoreo primario multipropósito, el cual busca recolectar información sobre el sistema natural, el estado y las tendencias a largo plazo de los sistemas acuíferos identificados en el país.

A *escala regional*, el monitoreo tiene como objetivos recolectar y analizar información de los diferentes sistemas acuíferos del país para determinar y verificar su estado y lograr una gestión eficaz que permita controlar los impactos ambientales negativos de la extracción del agua subterránea y de la generación de cargas contaminantes; de esta forma, se garan-




Figura 77. Tipos de redes de monitoreo de agua subterráneas en Colombia.

tiza que no se sobreexplote el recurso, y que las comunidades que hacen uso de este tengan acceso en cantidad y calidad. Este monitoreo soporta y actualiza los MHC de los sistemas acuíferos en cada uno de los componentes citados: modelo geológico, modelo hidrológico, modelo hidráulico, modelo hidrogeoquímico y modelo isotópico. Estas redes a cargo de las autoridades ambientales son de referencia regional y deben abarcar iones mayores y menores, parámetros *in situ* y todas aquellas variables de pertinencia regional con la frecuencia mínima que establece el Protocolo de Monitoreo y Seguimiento del Agua (Ideam e Invemar, 2021).

En el *ámbito local*, las acciones de monitoreo de aguas subterráneas se enfocan en los impactos que puedan producir las actividades económicas que aprovechan o afectan estos cuerpos de agua. Tal es el caso de proyectos licenciados, estaciones de gasolina o actividades agroindustriales, entre otras. Las variables y frecuencias de monitoreo están definidas por el tipo de actividad y la condición de vulnerabilidad intrínseca de las áreas de influencia directa e indirecta de las intervenciones.

### 4.1.4 Inventario nacional de puntos de agua subterránea

Con el fin de conocer las características generales de los puntos de aguas subterráneas existentes (pozos profundos, aljibes, piezómetros, manantiales), se adelanta un inventario de estos puntos en el país. Según los lineamientos de los proyectos o los objetivos de las entidades que los aplican, se determinará el tipo de inventario que se debe realizar (nacional, regional o local). Un inventario adecuado se elabora mediante el uso del Formulario único nacional de inventario de puntos de agua subterránea (Funias), que es la herramienta de gestión diseñada por el SGC, el MADS y el Ideam para sistematizar los inventarios adelantados en los sistemas acuíferos de Colombia. El inventario debe dar cuenta de información general y específica sobre el punto en relación con su ubicación, identificación, propietarios del predio, geología, geomorfología, características de construcción y diseño, características hidráulicas, condiciones de calidad, usos del agua, diagnóstico sanitario, registro de niveles, caudales y pruebas de bombeo, entre otras. (Ideam, 2015).

## 4.2 Aspectos metodológicos

La Figura 78 ilustra el esquema metodológico del capítulo; allí se resaltan los procesos adelantados para la caracterización del estado actual del monitoreo de aguas subterráneas a nivel de redes regionales en Colombia; la actualización del inventario nacional de puntos de aguas subterráneas, y de los usos y volúmenes de agua concesionada y captada a nivel nacional (a través de los registros de la TUA al MADS periodo 2016 a 2021); la actualización y presentación de nuevas fichas de los sistemas acuíferos de Colombia; y, finalmente, algunos avances en el conocimiento de las aguas subterráneas de Colombia en 2018-2022.

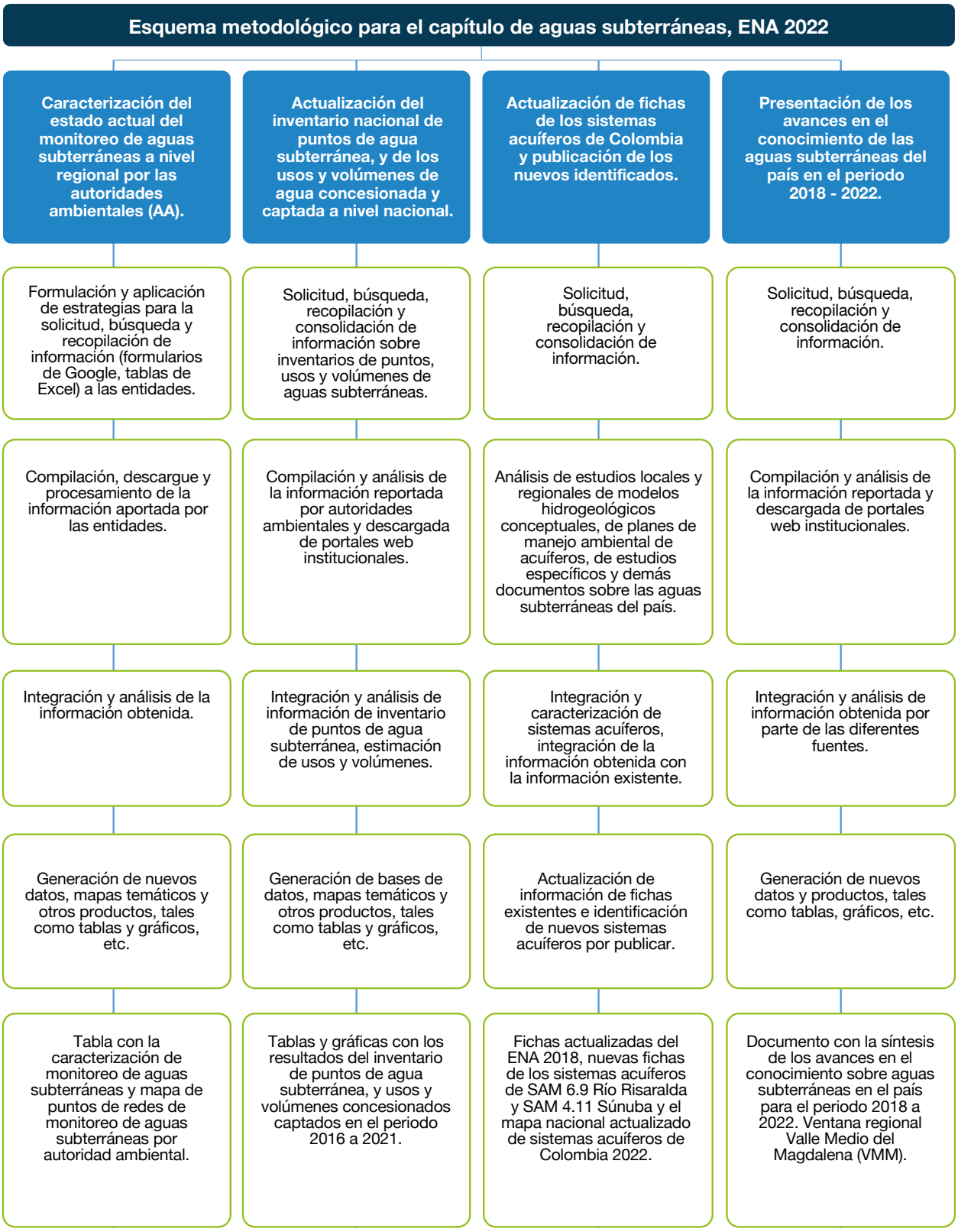



Figura 78. Esquema metodológico para el capítulo de aguas subterráneas, ENA 2022.

Desde el punto de vista metodológico, la elaboración de este capítulo sigue algunos procedimientos adelantados en los ENA predecesores, basados, principalmente, en la generación, complementación y actualización de información hidrogeológica a escala nacional. Así mismo, se realizó la inclusión de nuevos aportes que contribuyen a mejorar los resultados obtenidos en las versiones anteriores; para ello, se adelantó la recopilación, la revisión y el análisis de fuentes de información (estudios, documentos y bases de datos) generadas por autoridades ambientales y diferentes entidades del orden nacional y regional que, en el marco de sus funciones, han generado información sobre las aguas subterráneas del país en los últimos cuatro años (como el SGC, la Anla y Ecopetrol, entre otras).

En este ENA 2022, se adelanta una **caracterización general** del estado actual del monitoreo de las aguas subterráneas a nivel regional (autoridades ambientales). Este proceso se llevó a cabo mediante la recopilación, la consolidación y el análisis de información aportados a través de herramientas (como formularios de Google y tablas de Excel) por diez autoridades ambientales que en sus jurisdicciones tienen implementadas redes de monitoreo sistemático de aguas subterráneas, con variables y frecuencias definidas.

Durante este proceso, las distintas entidades entregaron información detallada de las redes de monitoreo, lo que permitió identificar aspectos como nombre de la red, objetivos, alcance y ubicación de los puntos que conforman la red; sistemas acuíferos o unidades hidrogeológicas monitoreadas; cantidad y tipos de puntos de monitoreo; frecuencias y variables de monitoreo en cantidad y calidad; instrumentación, y flujo de la información, entre otros.

De igual manera, se analizó la información entregada por algunas empresas prestadoras de servicios de acueducto que no tienen redes de monitoreo implementadas, pero que sí adelantan monitoreo en puntos de aguas subterráneas seleccionados según los objetivos trazados en diferentes proyectos de carácter regional o local.

Para la **actualización del inventario nacional de puntos de agua subterránea** se hizo revisión, compilación y análisis de la información secundaria reportada por las autoridades ambientales y disponible en el SIRH; y se complementó con la información oficial entregada al Ideam por estas y otras entidades a través de bases de datos en formato Excel, inventarios de captaciones y documentos como los planes de manejo ambiental de acuíferos (PMAA) y los modelos hidrogeológicos conceptuales, entre otros.

En este proceso se extrajeron todos los puntos y se verificó que no hubiera puntos con duplicidad de coordenadas o de ubicación geográfica; para los casos en los que se presentó esta situación, se tomó solamente un punto. Además, se adelantó la actualización de los usos y volúmenes concesionados a nivel nacional por parte de las corporaciones autónomas regionales a través de la información que estas reportan al MADS por concepto del cobro de TUA. Para la discriminación de los usos, se verificó la información reportada por cada usuario y, en los casos en que se reportaron varios usos, se escogió el de mayor importancia para generar un registro de usos más exacto.

Por otra parte, se actualizaron las fichas de los sistemas acuíferos presentadas en el ENA 2018, para lo cual se realizó una recopilación de información bibliográfica y documental de avances en los MHC realizados en los contextos local y regional, así como los incluidos en planes de manejo ambiental de acuíferos (PMAA) que adelanta cada autoridad ambiental y los generados en otros estudios específicos.

Se incluyeron, además, dos nuevos sistemas acuíferos identificados en los departamentos de Boyacá y Caldas, en áreas de las jurisdicciones de Corpochivor y Corpocaldas.

Para la actualización de las fichas, se tomó como referencia la información suministrada por las autoridades ambientales en cuanto a redes de monitoreo de agua subterránea; además, se revisó e incluyó la información proveniente de los PMAA elaborados entre el 2018 y el 2022, y se actualizaron aspectos relacionados con los inventarios de puntos de aguas subterráneas, redes de monitoreo y tipos de agua, entre otros.

Los avances en el estado del conocimiento de las aguas subterráneas en Colombia entre 2018 y 2022

a nivel de entidades nacionales se sintetiza en los siguientes contenidos que publicó el SGC:

- «Generación de conocimiento hidrogeológico que permita establecer la ocurrencia, origen y conexión entre los flujos de agua subterránea de la cuenca alta de las quebradas La Baja y Angostura con el Páramo de Santurbán mediante técnicas hidrogeoquímicas e isotópicas» (Servicio Geológico Colombiano, 2022). En esta versión, disponible en el Motor de Integración de Información Geocientífica (MIIG), se presenta la versión del año 2022, con anexos de resultados de análisis fisicoquímicos, hidrogeoquímicos e isotópicos.

- «Modelo Hidrogeológico Conceptual Valle Medio del Magdalena Planchas 108 y 119 Puerto Wilches, Barrancabermeja, Sabana de Torres y San Vicente de Chucurí» (Cañas et al., 2019).

Este último estudio sirvió de soporte para determinar la línea base ambiental (LBA) del estudio de aguas subterráneas en el marco del Decreto 328 de 2020 del Ministerio de Minas y Energía (Minenergía), por el cual «se fijan lineamientos para adelantar Proyectos Piloto de Investigación Integral PPII sobre Yacimientos No Convencionales YNC de hidrocarburos con la utilización de la técnica de Fracturamiento Hidráulico Multietapa con Perforación Horizontal FH PH, y se dictan otras disposiciones». En este decreto se le ordenó al Ideam consolidar las líneas base de aguas superficiales y subterráneas, estas últimas con base en la información hidrogeológica que suministre el Servicio Geológico Colombiano (SGC). En particular, la línea base ambiental hidrogeológica tuvo como objetivo identificar los vacíos de información y orientar las líneas base regionales con el propósito de disponer de información robusta de referencia respecto al estado de las aguas subterráneas en las áreas de influencia directa (AID) e indirecta (AII), definidas para el desarrollo de los PPII en el VMM (Valle Medio del Magdalena). Los resultados de la línea base se pueden consultar a través del documento denominado *Línea base general ambiental en los componentes de aguas superficiales y subterráneas articulados*, el cual se encuentra cargado en la base de datos de la Biblioteca Virtual del Centro de Transparencia PPII, del Minenergía (Ideam y ANH, 2022).

## 4.3 Avances del seguimiento y evaluación de las aguas subterráneas en las autoridades ambientales en Colombia

En este aparte, se presentan los resultados temáticos obtenidos para el capítulo Aguas subterráneas del ENA 2022, siguiendo la metodología que se ilustró antes en la Figura 78.

### 4.3.1 Caracterización del estado actual del monitoreo de aguas subterráneas a nivel regional

Las redes regionales de monitoreo de aguas subterráneas en Colombia son operadas por las autoridades ambientales, quienes según lo estipulado en el artículo 9° del Decreto 1323 de 2007 están obligadas a «…realizar el monitoreo y seguimiento del recurso hídrico en el área de su jurisdicción, para lo cual deberán aplicar los protocolos y estándares establecidos en el SIRH».

En la Tabla 30, se presentan las características y los elementos importantes de las redes de monitoreo de aguas subterráneas implementadas por la AMVA, CAR, Carder, Carsucre, Corantioquia, Corpocaldas, Corpochivor, Corpourabá, CRQ y CVC. Estas autoridades ambientales son aquellas que han reportado información de monitoreo para este estudio.

La Tabla 31 (se encuentra más adelante) muestra que la mayoría de las redes caracterizadas adelantan el monitoreo de variables de cantidad (niveles piezométricos) y calidad (fisicoquímicas, microbiológicas e hidrogeoquímicas); solamente AMVA y Corpochivor analizan variables isotópicas ($^{18}O$ y $^{2}H$). Por su parte, las frecuencias de monitoreo varían entre mensuales, semestrales y anuales.

Los objetivos de monitoreo de estas redes van encaminados al conocimiento de la dinámica y del estado de la calidad y cantidad del agua de los principales acuíferos en las jurisdicciones de las autoridades ambientales. La instrumentación se compone más que todo de equipos como medidores multiparamétricos y muestreadores (*bailers*) para medir variables y tomar muestras de calidad *in situ*, y sondas piezométricos y registradores de datos (*dataloggers*) para medir niveles piezométricos.

Tabla 30. Caracterización de redes de monitoreo de aguas subterráneas a nivel regional por autoridades ambientales.

| Nombre de la entidad | Nombre de la red | Acuíferos o unidades hidrogeológicas monitoreadas | Cantidad y tipos de puntos | Variables y frecuencia de monitoreo | Instrumentación | Flujo de la información | Año inicio monitoreo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) | Red Río | - Acuífero libre del Valle de Aburrá.<br>- Acuífero semiconfinado del Valle de Aburrá.<br>- Acuífero de la Dunita de Medellín. | 102 puntos (67 aljibes, 12 pozos, 10 piezómetros, 8 manantiales). En 5 pozos se miden variables isotópicas. | **Variables:**<br>- Cantidad (niveles piezométricos).<br>- Calidad: fisicoquímicas, microbiológicas.<br>- Hidrogeoquímica, Isotopía ($^{18}O$ y $^{2}H$).<br>**Frecuencia:**<br>- Calidad (semestral); hidrogeoquímica (semestral).<br>- Cantidad (mensual).<br>- Isotopía: lluvia (mesual), aguas subterráneas (semestral). | - Sondas de nivel piezométrico y multiparámetricos. Registrador de datos (*datalogger*) de nivel.<br>- *Datalogger* de presión.<br>- Sensores de nivel de agua subterránea (en prueba). | La información después de cada campaña de monitoreo es cargada a la plataforma web del proyecto y almacenada en el servidor de la entidad. | 2010 |
| Corporación Autónoma Regional del Cundinamarca (CAR) | Red de monitoreo cuenca del río Bogotá (alta y media) y cuenca alta del río Suárez. | - Depósitos de Terraza Alta, formación Chía y formación Subachoque.<br>- Formación Tilatá y formación Arenisca Tierna del Grupo Guadalupe.<br>- Formación Conejo y la formación Areniscas de Chiquinquirá. | 750 puntos (pozos).<br>13 pozos monitorean calidad (3 en la cuenca Alta río Suárez y 10 en cuenca del río Bogotá). | **Variables:**<br>- Cantidad (niveles piezométricos).<br>- Calidad: físicas (pH, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad, sólidos suspendidos).<br>**Frecuencia:**<br>- Cantidad y calidad (anual). | - Sondas de nivel piezométrico.<br>- Sondas multiparamétricas con sensores. | Almacenamiento en bases de datos internas de la Corporación. | 1998 |
| Corporación Autónoma Regional de Risaralda (Carder) | Red de monitoreo PMIAS 2007 y Red hidroclimatológica de Risaralda. | Acuífero del Abanico del Quindío, Risaralda y Valle. | 25 puntos.<br>20 pozos que monitorean calidad y 5 piezómetros que monitorean cantidad. | **Variables:**<br>- Calidad (fisicoquímicas, microbiológicas, hidrogeoquímica).<br>**Frecuencia:**<br>- Calidad (anual). | - Multiparamétricos de campo. | Almacenamiento en base de datos de la Corporación y se remite oficio informativo al usuario asociado al punto de monitoreo. | 2007 |
| Corporación Autónoma Regional de Sucre (Carsucre) | Red de monitoreo interno acuífero Morroa. | Sistema acuífero Morroa. | 31 puntos.<br>(29 piezómetros y 2 pozos de observación). | **Variables:**<br>- Cantidad (niveles piezométricos).<br>- Calidad: fisicoquímicas, microbiológicas.<br>**Frecuencia:** cantidad, calidad (anual). | - Sondas de nivel piezométrico y sensores de niveles continuos. | Almacenamiento en bases de datos internas de la Corporación. | 2001 |
| Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (Corantioquia) | Red Piragua | -Acuífero del Bajo Cauca antioqueño.<br>- Acuífero del Occidente antioqueño.<br>-Acuífero del Magdalena Medio.<br>-Acuífero del Valle de Aburrá.<br>-Acuífero Pintada-Valparaíso. | 145 puntos (82 aljibes, 46 pozos, 11 piezómetros y 6 manantiales).<br>70 miden ambas variables, 64 calidad y 11 cantidad. | **Variables:**<br>- Cantidad (niveles piezométricos).<br>- Calidad: fisicoquímicas, microbiológicas.<br>**Frecuencia:**<br>- Calidad (semestral).<br>- Cantidad (semestral). | Sondas piezométricas, multiparamétrico, Baro Diver, sonda para medición de niveles de profundidad (piezómetro). | Se almacena en los servidores de la entidad y se publica en su página web. | 2011 |
| Corporación Autónoma Regional de Caldas (Corpocaldas) | Red de monitoreo agua subterránea en Caldas | -Acuífero Santágueda.<br>-Acuífero del río Risaralda.<br>-Acuífero Río Grande de la Magdalena. | 65 puntos (31 pozos, 23 aljibes, 5 manantiales y 6 piezómetros). | **Variables:**<br>- Cantidad (niveles piezométricos y caudales).<br>- Calidad: fisicoquímicas, microbiológicas, hidrogeoquímicas.<br>**Frecuencia:**<br>- Calidad (anual), cantidad (anual). | Sonda multiparamétrica. Equipos para recolección y preservación de muestras. | La información se dispone en el sitio web de la entidad que permite el almacenamiento, la visualización y la descarga de información. Ubicado en el siguiente enlace: https://goo.gl/6tt7gZ | 2009 |

| Nombre de la entidad | Nombre de la red | Acuíferos o unidades hidrogeológicas monitoreadas | Cantidad y tipos de puntos | Variables y frecuencia de monitoreo | Instrumentación | Flujo de la información | Año inicio monitoreo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Corporación Autónoma Regional de Chivor (Corpochivor) | Red de monitoreo acuífero Súnuba | -Sistema acuífero formación geológica Fómeque. Unidad hidrogeológica C1. | 4 puntos: 2 pozos (miden cantidad y calidad) y 2 piezómetros (miden cantidad, calidad e isotopía). | **Variables:** - Cantidad (niveles piezométricos) - Calidad (fisicoquímicas y microbiológicas). Isotopía ($^{18}O$ y $^{2}H$). **Frecuencia:** - Cantidad (mensual). - Calidad (mensual). - Isotopía (mensual). | Sonda de nivel, muestreadores (*bailers*), multiparamétrico con sondas y turbidímetro. | Los resultados son almacenados en bases de datos de Excel. | 2021 |
| Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá (Corpourabá) | Red de monitoreo del sistema acuífero del golfo de Urabá | Sistema acuífero del golfo de Urabá. Unidades del Cuaternario y del Terciario (T2B y T2) formación Corpa. | 99 puntos (43 piezómetros y 56 pozos). 41 monitorean calidad y cantidad, y 58 solo monitorean cantidad. | **Variables:** - Cantidad (niveles piezométricos). - Calidad (fisicoquímicas y microbiológicas). **Frecuencia:** - Cantidad (trianual). - Calidad (anual). | Medidores continuos de niveles, bomba de purga, multiparamétrico, sonda TLC, sonda de niveles. | La información es almacenada en una base de datos en Access. Se realiza un informe anual sobre el comportamiento de la calidad y cantidad del agua subterránea del acuífero. | 1994 |
| Corporación Autónoma Regional del Quindío (CRQ) | Red quindiana de monitoreo del acuífero somero del abanico Quindío Risaralda. | Acuífero Somero del Abanico Quindío Risaralda. | 26 puntos (aljibes). | **Variables:** - Cantidad (niveles piezométricos). - Calidad (fisicoquímicas). **Frecuencia:** - Cantidad (mensual). - Calidad (mensual). | Sonda de niveles piezométricos y sonda multiparamétrica. | Se almacena en bases de datos en los servidores de la Entidad. | 2022 |
| Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) | Red de monitoreo de niveles | Sistema acuífero del Valle del Cauca. | 282 puntos (pozos). | **Variables:** - Cantidad (niveles piezométricos). **Frecuencia:** - Cantidad (trianual). - Calidad (anual). | Sonda de niveles piezométricos. | Los datos se almacenan en GeoCVC y bases de datos de Excel internamente en el Grupo Recursos Hídricos de la CVC. | 2022 |
| | Red de seguimiento a actividades potencialmente contaminantes | | 730 puntos (pozos). | **Variables:** - Cantidad (niveles piezométricos y caudales). - Calidad: fisicoquímicas, microbiológicas e hidrogeoquímicas. **Frecuencia:** - Cantidad y calidad (entre 1 y 3 años). | Bombas sumergibles, muestreadores (*bailers*), sonda multiparamétrica, sondas de niveles, plantas eléctricas, variadores de frecuencia, cintas de pH. | Los datos se almacenan en bases de datos de Excel internamente en el Grupo de Recursos Hídricos de la CVC. | 1996 |

La mayoría de los datos generados y analizados en las redes son almacenados en las bases de datos de las entidades y publicados en los portales web institucionales de estas a través de geovisores u otras herramientas. En relación con los registros históricos de datos; redes como la de Red de monitoreo del sistema acuífero del golfo de Urabá, de Corpourabá, genera datos desde los años 90, y otras más recientes, como la Red quindiana de monitoreo del acuífero Somero del Abanico Quindío - Risaralda, de la CRQ, que inició monitoreo en el 2022.

Los puntos de monitoreo de aguas subterráneas en las redes implementadas por las autoridades ambientales caracterizadas suman un total de 2273 puntos de observación. Sobresalen la CVC y la CAR con el 67 % (1012 puntos) y 49 % (750 puntos), respectivamente. Autoridades ambientales como Carder, Corpocaldas, Corpochivor y CRQ poseen una densidad menor a 50 puntos en sus redes, por lo que no se presentan en la gráfica (Figura 79).

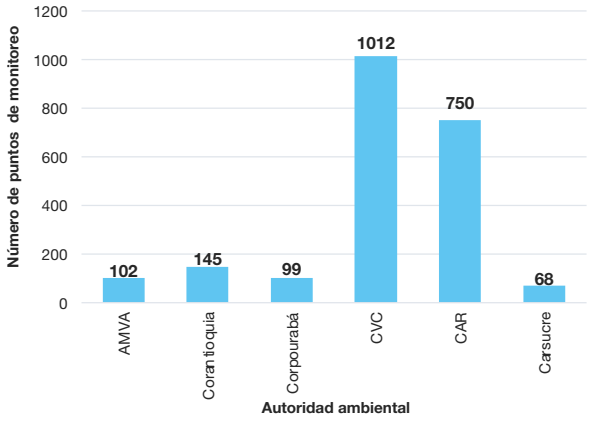



Figura 79. Cantidad de puntos monitoreados por la autoridad ambiental.
Fuente: autoridades ambientales competentes.

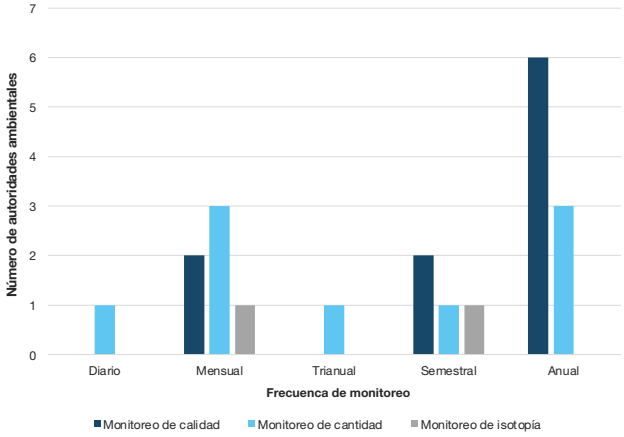



Figura 80. Tendencias de las frecuencias de monitoreo.
Fuente: autoridades ambientales competentes.

Con relación a la frecuencia de monitoreo, esta varía en gran proporción dependiendo de la autoridad ambiental y los parámetros medidos por esta (Figura 80). Los resultados obtenidos muestran que las frecuencias que más predominan para mediciones de cantidad y calidad son anual, semestral y mensual. Por otro lado, las variables de isotopía se suelen medir de forma mensual o semestral.

La Figura 81 muestra que todas las autoridades ambientales caracterizadas monitorean en sus redes variables de cantidad y calidad. Adicionalmente, la AMVA y Corpochivor monitorean variables isotópicas.

A propósito de las variables de calidad, según muestran la Tabla 31 y la Figura 82, los parámetros que más se monitorean a nivel regional son la conductividad eléctrica con 100 %, seguido por los nitratos, el calcio, el pH y el hierro, que representan cada uno un 89 % del monitoreo a escala regional. En contraste, los que menos se monitorean son los pesticidas, el aluminio, el cloro y el manganeso, con porcentajes entre el 7 % y el 20 %. Los parámetros microbiológicos, como la *E. coli* y los coliformes se monitorean en un 50 % de las redes. Corpochivor, CVC, Corantioquia y Corpourabá son las que monitorean mayor cantidad de variables de calidad.

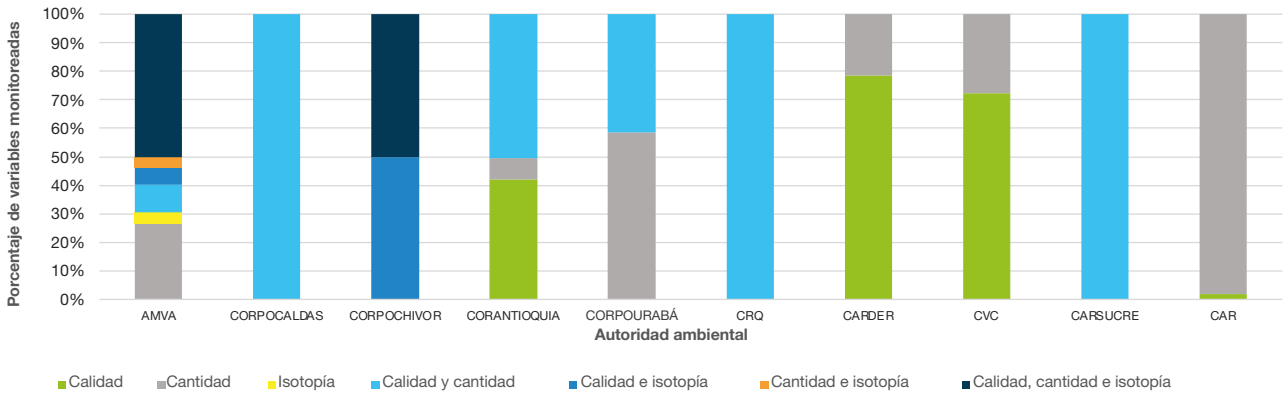



Figura 81. Caracterización de variables monitoreadas por autoridades ambientales.

Tabla 31. Parámetros de calidad monitoreados por las autoridades ambientales.

| Autoridad / parámetros | AMVA | CORPOCALDAS | CORPOCHIVOR | CORANTIOQUIA | CRQ | CORPOURABÁ | CARDER | CARSUCRE | CAR | CVC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| pH | X | | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Nitratos | X | X | X | X | | X | X | X | | X |
| Dureza | X | X | X | X | | X | | X | | X |
| Calcio | X | X | X | X | | X | X | X | | X |
| Magnesio | | X | X | X | | X | X | X | | X |
| Sodio | | X | X | X | | | X | X | | X |
| Potasio | | X | X | X | | X | X | X | | X |
| Sulfatos | X | X | X | X | | X | X | X | | X |
| Carbonatos | | | X | X | | X | | X | | X |
| Bicarbonatos | | X | X | X | | X | | X | | X |
| Oxígeno disuelto (OD) | X | X | X | X | X | X | | | X | X |
| Sólidos disueltos totales (SDT) | X | | X | X | | X | X | X | X | X |
| Color | X | | X | X | | | X | X | | X |
| *E. coli* | X | | X | X | | X | | | | |
| Hierro | X | X | X | X | | X | X | X | | X |
| Cobre | X | | X | X | | | X | | | |
| Conductividad | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Coliformes | X | | X | X | | X | X | X | | X |
| Manganeso | X | | | | | X | X | | | |
| Alcalinidad | | X | X | X | | X | X | X | | X |
| Temperatura | | X | X | X | X | X | X | | X | X |
| Aluminio | | | | | | X | | | | X |
| Cloro | | X | X | | | | | | | X |
| Pesticidas | | | X | | | | | | | |

Fuente: autoridades ambientales competentes.

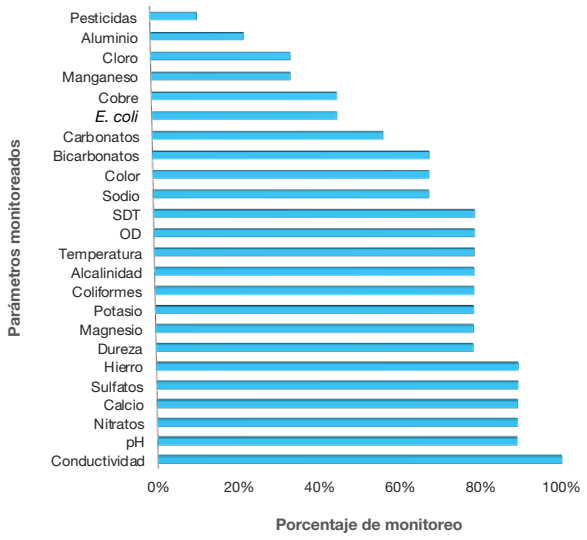



Figura 82. Porcentaje de parámetros monitoreados.
Fuente: autoridades ambientales competentes.

Finalmente, en la Figura 83 se presenta el mapa que muestra la ubicación de los puntos que conforman las redes de monitoreo de aguas subterráneas implementadas por las diez autoridades ambientales.

Los resultados obtenidos para la caracterización de redes de monitoreo de empresas prestadoras de servicios de acueducto evidenciaron vacíos de información. Debido a esto, los aportes de estas entidades no se incluyen en este documento.

En términos generales, se resalta un monitoreo de las aguas subterráneas insuficiente tanto en cantidad como en calidad. Este monitoreo no alcanza el 25 % de las autoridades ambientales y no cubre todos los sistemas acuíferos identificados en el país.

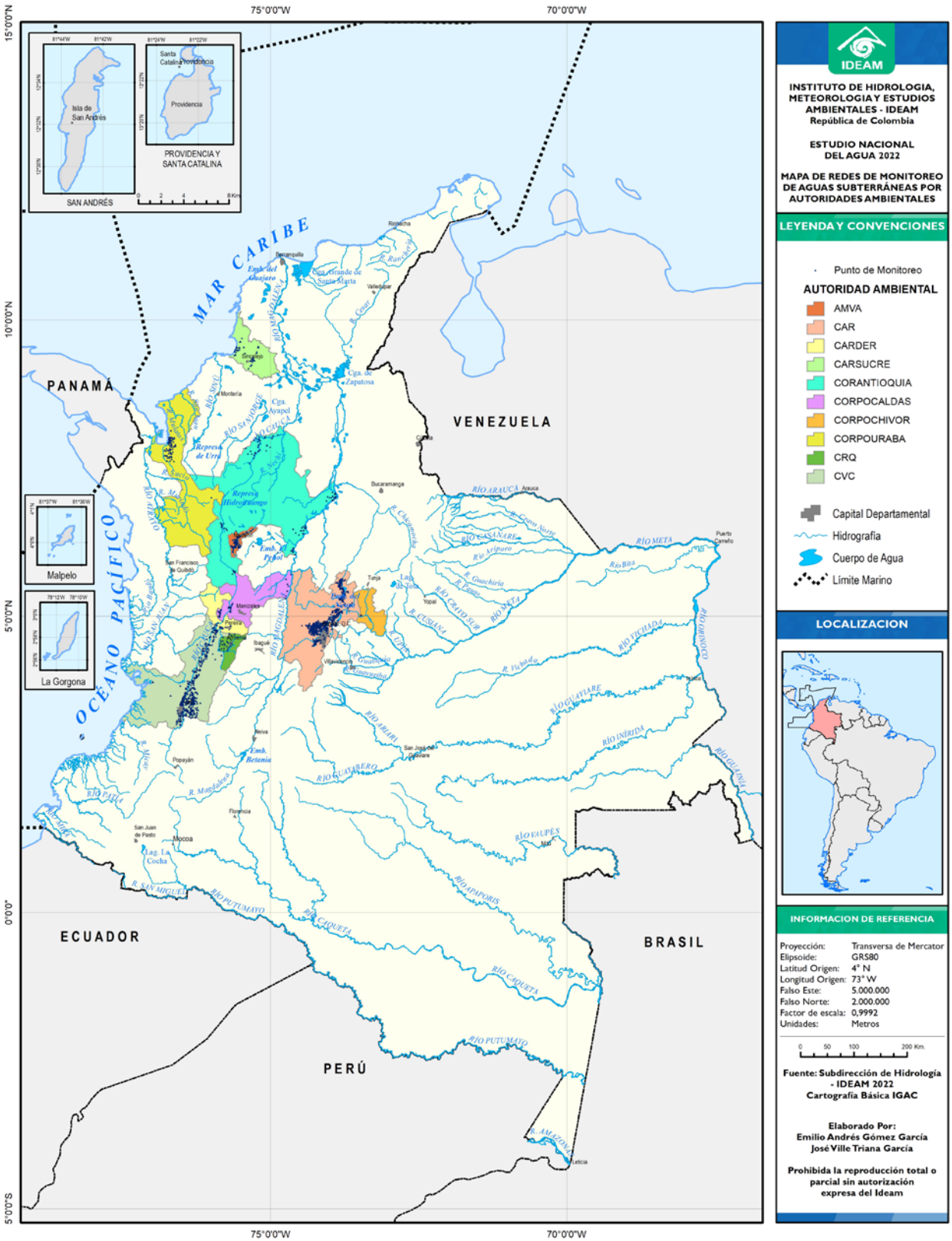



Figura 83. Mapa de puntos de redes de monitoreo de aguas subterráneas por autoridades ambientales.

### 4.3.2 Actualización del inventario de puntos de agua subterránea a nivel nacional

El análisis de los reportes de las bases de datos enviados por las autoridades ambientales a la fecha, y la revisión y descargue de la información disponible en el SIRH y de otros documentos como PMAA y MHC permitió identificar leves aumentos en el número de puntos de aguas subterráneas en ocho autoridades ambientales (CAM, Cardique, Corpocaldas, Corpochivor, Corpomojana, DADMA, CDMB y CBS) en relación con reportes de anteriores ENA. Como se muestra en la Tabla 32, a la fecha se han contabilizado un total de 68.397 puntos de agua subterránea en el país, lo que representa un aumento aproximado de 6,5 % respecto al ENA 2018 y de 35,5% con relación al ENA 2014.

En relación con la clasificación por tipo de punto, la Figura 84 muestra gráficamente los resultados obtenidos. El tipo de punto más usado en el país es el aljibe con el 57 % del total de puntos, seguido de los pozos con 25 %. Por otro lado, el menos representativo es el piezómetro, con el 0,3 %. Y un 10 % del total de puntos no reporta información.

Los resultados de la clasificación por condición de los puntos muestran que no se cuenta con información para el 53,3 %. El 46,7 % restante está representado principalmente por puntos en estado productivo que corresponden al 29 %. Los puntos de monitoreo y los sellados representan un 3,7 %, por lo que no se presentan en la Figura 85.

El inventario sigue siendo insuficiente y lleva a concluir que el país desconoce los dominios de aprovechamiento del agua subterránea en el territorio.

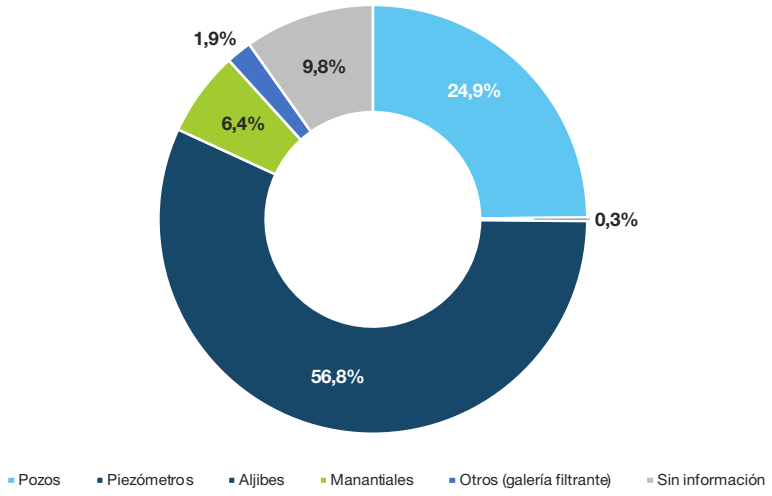



Figura 84. Resultados de clasificación por tIpo de puntos de agua subterránea.

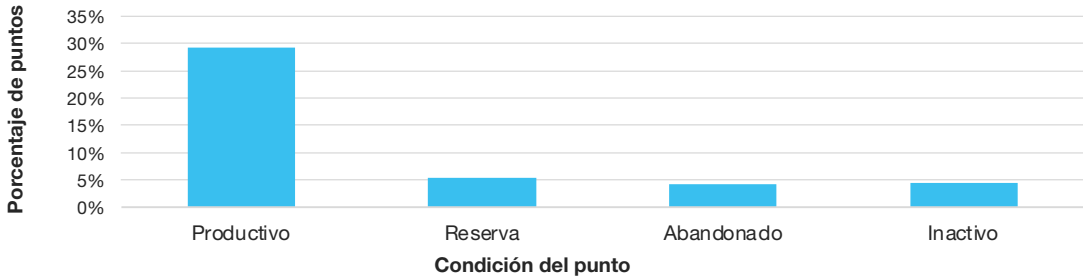



Figura 85. Clasificación por condición de puntos de agua subterránea.
Fuente: autoridades ambientales competentes.

Tabla 32. Reporte de inventario de puntos de aguas subterráneas clasificados por tipo y condición.

| Autoridad ambiental | Tipo | | | | | | | Condición | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Pozos | Piezómetros | Aljibes | Manantiales | Otros | Sin información | Total | Productivo | Reserva | Abandonado | Inactivo | Monitoreo | Sellado | Otro | Sin información | Total |
| AMVA | 47 | | 696 | 12 | 4 | 0 | 759 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | 759 | 759 |
| BARR_VERDE | | | 9 | | | | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | 9 | 9 |
| CAM | 289 | | 439 | 40 | | 352 | 1120 | | | | | | | | 1120 | 1120 |
| CAR | 4702 | | 953 | 559 | 0 | 1165 | 7379 | 2491 | 635 | 1257 | 443 | 113 | 26 | 305 | 2109 | 7379 |
| CARDER | 178 | | 1952 | 406 | | | 2536 | 264 | 139 | 10 | 23 | 39 | | | 2061 | 2536 |
| CARDIQUE | 49 | | 77 | 18 | 0 | 7 | 151 | 19 | 0 | 2 | 0 | 10 | | | 120 | 151 |
| CARSUCRE | 1713 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 1713 | 1653 | 0 | 9 | 4 | 47 | | | 0 | 1713 |
| CAS | 49 | | 167 | 320 | 0 | 180 | 716 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | 716 | 716 |
| CDA | 352 | | 31 | 30 | | 28 | 441 | 126 | 5 | 6 | 1 | 303 | | | 0 | 441 |
| CODECHOCÓ | 16 | | 15 | | | | 31 | 18 | | | 9 | | | | 4 | 31 |
| CORALINA | 33 | | 6002 | 0 | 0 | 0 | 6035 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | 6035 | 6035 |
| CORANTIOQUIA | 167 | | 2358 | 32 | 0 | 0 | 2557 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | 2557 | 2557 |
| CORMACARENA | 360 | | 1717 | 922 | 984 | 585 | 4568 | 280 | 163 | 94 | 340 | 0 | | | 3691 | 4568 |
| CORNARE | 306 | | 144 | 0 | 0 | 1 | 451 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | 451 | 451 |
| CORPAMAG | 344 | | 205 | 0 | 0 | 0 | 549 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | 549 | 549 |
| CORPOAMAZONIA | 5 | 14 | 1796 | 45 | 0 | 1 | 1861 | 1305 | 93 | 30 | 135 | 8 | 11 | | 279 | 1861 |
| CORPOBOYACÁ | 202 | | 423 | 1402 | | 352 | 2379 | 671 | 14 | 4 | 5 | 0 | | | 1685 | 2379 |
| CORPOCALDAS | 224 | 8 | 621 | 104 | | 107 | 1064 | 443 | 73 | 185 | 107 | 2 | 22 | | 232 | 1064 |
| CORPOCESAR | 1117 | | 3658 | 78 | 1 | 2 | 4856 | 2942 | 568 | 343 | 30 | 0 | | | 973 | 4856 |
| CORPOCHIVOR | 1 | | 65 | 225 | | 610 | 901 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | 901 | 901 |
| CORPOGUAJIRA | 1148 | | 1170 | 4 | 309 | 0 | 2631 | 257 | 0 | 160 | 4 | 0 | | | 2210 | 2631 |
| CORPOGUAVIO | 17 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 17 | 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | 0 | 17 |
| CORPOMOJANA | 1056 | | | | | 155 | 1211 | 245 | 5 | 4 | 13 | | | | 944 | 1211 |
| CORPONARIÑO | 8 | | 307 | 38 | 0 | 0 | 353 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | 353 | 353 |
| CORPONOR | 14 | | 642 | 5 | 0 | 539 | 1200 | 510 | 30 | 15 | 1 | 0 | | | 644 | 1200 |
| CORPORINOQUÍA | 529 | | 841 | 52 | | 1 | 1423 | 720 | 97 | 24 | | | | 4 | 578 | 1423 |
| CORPOURABÁ | 488 | | 8354 | 17 | | 286 | 9145 | 5056 | 1359 | 93 | 1202 | 3 | 25 | 11 | 1396 | 9145 |
| CORTOLIMA | 134 | | 3600 | 17 | 0 | 79 | 3830 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | 3830 | 3830 |
| CRA | | | | | | 416 | 416 | 114 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | 302 | 416 |
| CRC | 16 | | 105 | 0 | 0 | 129 | 250 | 109 | 0 | 0 | 12 | 0 | | | 129 | 250 |
| CRQ | 106 | 158 | 1416 | | | 15 | 1695 | 351 | 371 | 118 | 478 | | 146 | 3 | 228 | 1695 |
| CVC | 2791 | 1 | 255 | 0 | 0 | 1158 | 4205 | 2477 | 205 | 593 | 283 | | 225 | 8 | 414 | 4205 |
| CVS | 253 | | 375 | 58 | 0 | 0 | 686 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | 686 | 686 |
| DADMA | | | 51 | | | 28 | 79 | | | | | | | | 79 | 79 |
| DAGMA | 293 | | 373 | 0 | 17 | 17 | 700 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | 700 | 700 |
| SDA | 0 | | 0 | 0 | 0 | 473 | 473 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | 473 | 473 |
| CDMB | | | | | | 1 | 1 | | | | | | | | 1 | 1 |
| CBS | | | | | | 6 | 6 | | | | | | | | 6 | 6 |
| **TOTAL** | **17007** | **181** | **38817** | **4384** | **1315** | **6693** | **68397** | **20068** | **3757** | **2947** | **3090** | **525** | **455** | **331** | **37224** | **68397** |

Fuente: autoridades ambientales competentes.

### 4.3.3 Volúmenes y usos concesionados y captados de aguas subterráneas a nivel nacional

#### Volúmenes

En la Tabla 33, se presentan los resultados de los cálculos de volúmenes concesionados y captados en m³/año y sujetos al cobro de la TUA. En el periodo del 2016 al 2021, se observa una diferencia considerable entre los volúmenes concesionados y captados, ya que estos últimos representan solo el 46 % del volumen concesionado. Ante este escenario, es importante mencionar que para este periodo estudiado se presentan vacíos de información, debido a que solo 23 de las 38 autoridades ambientales analizadas (es decir, el 60 %) reportaron los volúmenes concesionados y captados de sus usuarios. Esta situación fue más crítica para el periodo 2020 y 2021 en los que solo siete entidades (18 %) reportaron la información.

**Nota:** la información aportada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) fue entregada directamente por esta autoridad ambiental al Ideam y allí solo incluyeron datos de volúmenes concesionados, resaltando la ausencia de información sobre volúmenes captados.

Tabla 33. Volúmenes concesionados y captados (2016-2021).

| Año | Concesionado m³/año | Captado m³/año |
|---|---|---|
| 2016 | 735.806.759 | 117.657.582 |
| 2017 | 713.539.655 | 230.745.620 |
| 2018 | 1.134.545.777 | 257.030.781 |
| 2019 | 955.136.817 | 102.943.862 |
| 2020 | 950.585.597 | 43.562.435 |
| 2021 | 775.782.574 | 54.920.410 |
| **Total en m³** | **5.265.397.181** | **806.860.690** |

Fuente: bases de datos MADS y CVC, 2022.

En la Figura 86, se presentan gráficamente los porcentajes de los volúmenes concesionados en millones de m³ para cada autoridad ambiental en el periodo del 2016 al 2021, reportados por el MADS; en la figura resalta la CVC con la mayor cantidad de volúmenes concesionados a sus usuarios con un porcentaje cercano al 70 % del total. Otras autoridades —como la CRC, Corpourabá, CVS, Cormacarena, CAR y Corporinoquía— suman cerca de un 30 %. Por otro lado, Corpocaldas, Corpoguavio, Cardique, CDMB, AMVA, CDA, Corponariño, Cornare, DAGMA y CRQ representan las autoridades ambientales con menores volúmenes concesionados, con valores inferiores al 1 %.

En la Figura 87, se muestran graficados los porcentajes de los volúmenes captados en m³ para cada autoridad ambiental en el periodo 2016-2021. Como se observa, resaltan la CAR, Corporinoquía, Corpourabá, CRC y Cormacarena como las autoridades con mayores volúmenes captados por sus usuarios, aproximadamente un 67 % del total. Por otro lado, Corpocaldas, Corpoguavio, Cornare, CDMB, Cardique, AMVA, y CDA representan las autoridades ambientales con menores volúmenes captados, con valores inferiores al 1 %.

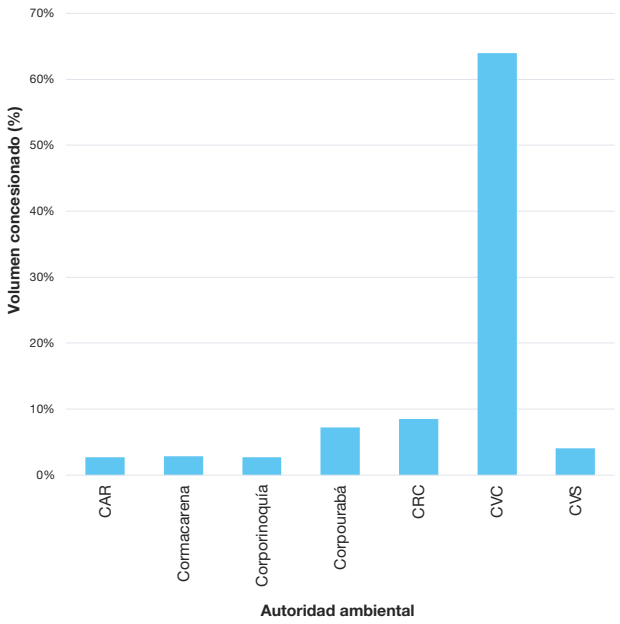



Figura 86. Porcentajes de volúmenes concesionados en m³ por autoridad en el periodo 2016-2021.
Fuente: base datos MADS y CVC, 2022.

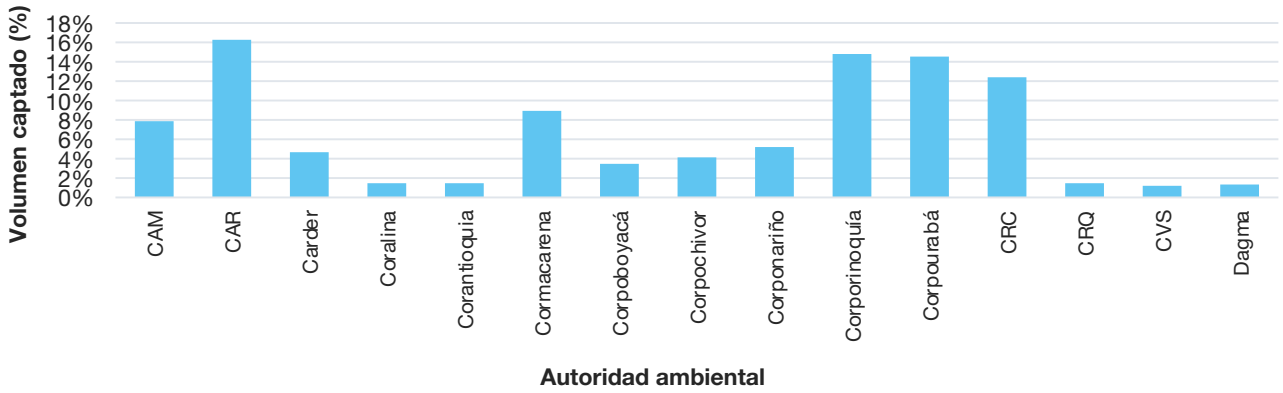



Figura 87. Volúmenes captados en m³ por autoridades ambientales en el periodo 2016-2021.
Fuente: base datos MADS, 2022.

## Usos

La Tabla 34 muestra que los usos de mayor importancia en el volumen concesionado son el agrícola (71 %), doméstico (10 %) y el industrial (13 %). Estos tres sectores abarcan el 94 % del total del volumen concesionado. Los sectores pecuario, agropecuario, piscícola, recreativo y otros representan aproximadamente el 6 %.

En la Tabla 35, se observa que el uso agrícola (25,8 %), doméstico (42,1 %) e industrial (20,1 %) representan cerca del 88 % del volumen captado. Sectores como el pecuario, agropecuario, piscícola, recreativo y otros representan alrededor de un 12 %.

Como ya se mencionó antes, para el periodo 2016-2021 se observa una diferencia considerable entre los volúmenes concesionados y captados más que todo por vacíos de información, ya que estos últimos representan solo el 46 % del volumen concesionado. Esta situación fue más crítica para el periodo 2020 y 2021 en los que solo siete entidades (18 %) reportaron la información; y la que aportó la CVC incluye los datos de volúmenes concesionados y resalta la ausencia de información sobre volúmenes captados.

Tabla 34. Volumen (m³) concesionado por usos (2016-2021).

| | Agrícola | Consumo doméstico | Industrial | Pecuario, agropecuario, piscícola | Recreativo | Otros |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2016 | 551.229.807 | 75.523.346 | 48.056.639 | 5.677.766 | 98.910 | 55.220.291 |
| 2017 | 393.219.856 | 141.090.815 | 95.035.475 | 8.323.465 | 200.144 | 75.634.201 |
| 2018 | 788.729.237 | 124.683.624 | 148.117.477 | 4.940.159 | 2.649.177 | 65.410.923 |
| 2019 | 666.456.221 | 83.951.309 | 162.944.167 | 3.321.746 | 590.078 | 37.856.717 |
| 2020 | 704.950.582 | 44.347.481 | 146.175.344 | 1.177.257 | 20.555 | 53.914.352 |
| 2021 | 354.588.204 | 72.277.735 | 75.614.304 | 2.706.522 | 79.927 | 2.951.751 |
| **Total** | **3.729.173.910** | **541.874.314** | **675.943.406** | **23.711.044** | **3.638.791** | **290.988.236** |
| **% usos del total concesionado** | **70,8%** | **10,2%** | **12,8%** | **0,5%** | **0,07%** | **5,5%** |

Fuente: base de datos de MADS y CVC, 2022.

Tabla 35. Volumen ($m^3$) captado por usos (2016-2021).

| Año / usos | Agrícola | Consumo doméstico | Industrial | Pecuario, agropecuario, piscícola | Recreativo | Otros |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2016 | 6.592.285 | 69.254.767 | 19.458.746 | 4.626.785 | 80.248 | 17.644.753 |
| 2017 | 40.396.770 | 107.412.771 | 55.905.289 | 7.876.925 | 200.144 | 18.918.023 |
| 2018 | 78.615.301 | 95.605.847 | 58.311.374 | 3.990.454 | 2.646.895 | 17.855.784 |
| 2019 | 66.076.702 | 18.735.418 | 8.071.662 | 1.420.335 | 20.549 | 8.651.073 |
| 2020 | 15.499.056 | 17.282.925 | 1.065.841 | 1.177.503 | 20.555 | 8.516.531 |
| 2021 | 588.204 | 31.607.582 | 19.500.602 | 265.561 | 75.378 | 2.883.082 |
| **Total** | **207.768.319** | **339.867.433** | **162.313.514** | **19.357.562** | **3.043.769** | **74.469.244** |
| **% usos del total captado** | **25,8%** | **42,1%** | **20,1%** | **2,4%** | **0,4%** | **9,2%** |

Fuente: base de datos MADS, 2022.

### 4.3.4 Fichas de sistemas acuíferos y mapa actualizado de estos

De los 65 sistemas acuíferos presentados en el ENA 2018, se actualizó la información publicada de los sistemas acuíferos que se muestran en la Tabla 36, cuyas fichas se presentan en el **Anexo 7**. Además, se incorporaron dos nuevas fichas correspondientes a los sistemas acuíferos de Súnuba SAM 4.11 (Figura 88) y Río Risaralda SAM 6.9 (Figura 89). También se presenta el mapa actualizado de sistemas acuíferos de Colombia (Figura 90), en el que aparecen los 67 sistemas acuíferos identificados en el país hasta la fecha.

Tabla 36. Fichas de sistemas acuíferos actualizadas.

| Sistema acuífero | Nombre | Actualización |
|---|---|---|
| SAM 1.1 | Valle Medio del Magdalena | Red de monitoreo |
| | | Tipo de agua |
| | | Inventario de puntos |
| SAM 1.2 | Mariquita-Dorado-Salgar | Red de monitoreo |
| SAM 6.1 | Glacis del Quindío | Red de monitoreo |
| | | Inventario de puntos |
| SAM 6.2 | Santagueda | Red de monitoreo |
| | | Inventario de puntos |
| SAM 6.3 | Valle de Aburrá | Red de monitoreo |
| SAM 6.4 | Santa Fe de Antioquia | Red de monitoreo |
| SAM 6.5 | Bajo Cauca antioqueño | Red de monitoreo |
| SAM 6.6 | La Pintada Valparaíso | Red de monitoreo |
| SAC 1.4 | Turbaco | Inventario de puntos |
| SAC 2.2 | La Mojana | Inventario de puntos |
| SAM 5.1 | Golfo de Urabá | Red de monitoreo |

Fuente: autoridades ambientales competentes.

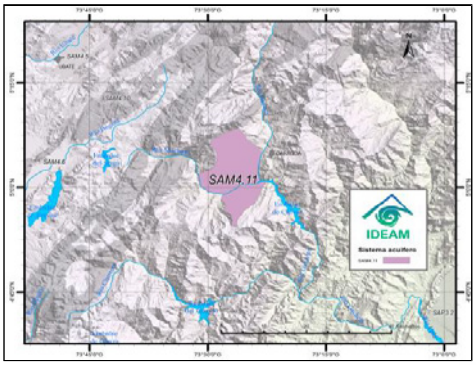
## SAM 4.11 SISTEMA ACUIFERO DE SÚNUBA

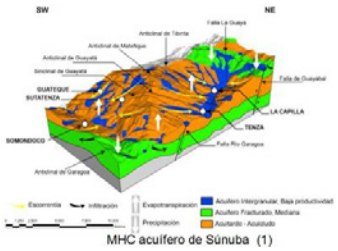
| Datos básicos | |
|---|---|
| Área hidrográfica | AH2 Magdalena-Cauca |
| Zona hidrográfica | ZH24 Sogamoso |
| Provincia hidrogeológica | PM4 Otros sistemas acuíferos en la región de la cordillera Oriental. |
| Superficie | 36,04 km² |
| N. ° de municipios que abarca | 5 |
| N. ° pozos inventariados (1) | 4 |
| N. ° aljibes inventariados (1) | 62 |
| N. ° manantiales inventariados (1) | 203 |
| CAR de gestión | Corpochivor |

**Características hidrológicas (1)**

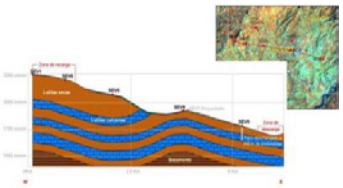
Zonas/fuentes de recarga: La precipitación media anual para el área es de 1471,92 mm.

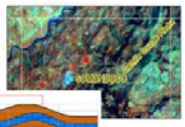
| | | |
|---|---|---|
| Recarga potencial | 462.36 | mm |
| Reservas calculadas | NRI | millones de m³ |
| Reservas explotables | NRI | millones de m³ |
| Demanda calculada | NRI | millones de m³/año |

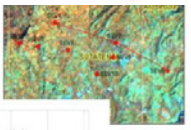


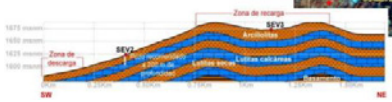



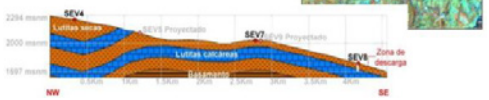

MHC acuífero de Súnuba (1)










Cortes hidrogeológicos y geoeléctricos de los municipios de Guateque, Sutatenza y Somondoco (1).

**Características hidrogeológicas (1)**

La cuenca del río Garagoa está localizada en el flanco oriental de la cordillera Oriental y forma parte del altiplano cundiboyacense, el cual drena en la vertiente oriental andina (1).

**Formación Fomeque (Kif):** periodo Cretácico inferior; constituida principalmente por lutitas grises oscuras a negras, interestratificadas con margas, limolitas y lentejones de calizas, con espesores desde los 3 m a 1700 m.

**Formación Une (Kiu):** periodo Cretácico inferior-superior; constituida por areniscas cuarzosas grises de grano fino a grueso, localmente conglomeráticas, algo micáceas, con espesores de hasta 500 m.

**Formación Chipaque (Ksc):** periodo Cretácico superior; constituida por lutitas negras con intercalaciones esporádicas de calizas, espesores desde 1 m a 565 m.

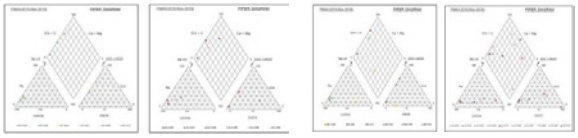
**Formación Dura y Planares (Ksgdp):** periodo Cretácico superior; constituida por cuarzoareniscas grises claras a blancas y limolitas silíceas, lutitas y areniscas, con espesores desde 5 cm a 171 m.

**Formación Arenisca de Labor-Tierna (Ksglt):** periodo Cretácico superior; constituida principalmente por limolitas de cuarzo, suprayacidas por secuencias de areniscascuarzosas, espesores de hasta 214 m.

**Hidroquímica e isotopía (1)**

**Tipo de agua**

Municipios de Guataque, Sutatenza y Somondoco: bicarbonata tipo cálcica.
Municipios de Tenza y La Capilla: clorurada cálcica.



**Redes de monitoreo (1)**

**Puntos de agua subterránea que conforman la red: 4**

- Piezómetros 2.
- Pozos 2.
- Calidad, Isotopía y Cantidad 2.
- Cantidad e Isotopía 2.

**Parámetros monitoreados:**

- **Calidad:** Alcalinidad, pH, COD, SDT, Coliformes totales, E.coli, Alcalinidad total, Dureza total, Sulfatos, Nitratos, Cloruros, Turbiedad, Magnesio, Calcio, Conductividad, Temperatura, DBO5, DQO, Nitritos y Fosfatos.
- **Cantidad:** piezometría.

**Frecuencia**

- **Calidad:** mensual.
- **Cantidad:** mensual.
- **Isotopía:** mensual.

Fuentes: (1) Corpochivor (2018).

NRI: No Registra Información.

Figura 88. Ficha de información del sistema acuífero SAM 4.11 Súnuba.
Fuente: Corpochivor, 2018.

## SAM 6.9 RÍO RISARALDA

**Datos básicos**

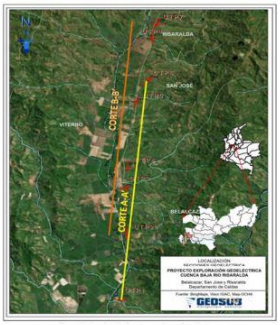
| | |
|---|---|
| Área hidrográfica | AH2 Magdalena-Cauca |
| Zona hidrográfica | ZH26 Cauca |
| Provincia hidrogeológica | PM6 Otros sistemas acuíferos en región cordillera Occidental-Central. |
| Superficie | 1278 km$^2$ |
| N.° de municipios que abarca | 4 |
| N.° pozos inventariados (1) | 2 |
| N.° aljibes inventariados (1) | 59 |
| N.° manantiales inventariados (1) | NRI |
| CAR de gestión | Corpocaldas |

**Características hidrológicas**[1]

Zonas/fuentes de recarga: Las zonas de recarga están definidas en 7 áreas a una altura promedio de 1050 m s. n. m. y un área total de 3486,87 ha.

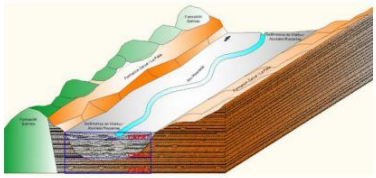
| | | |
|---|---|---|
| Recarga estimada | 17,7 - 191,3 | mm/mes |
| Reservas calculadas | NRI | millones de m$^3$ |
| Reservas explotables | NRI | millones de m$^3$ |
| Demanda calculada | NRI | millones de m$^3$/año |

Cortes Cuenca Baja Río Risaralda (1)

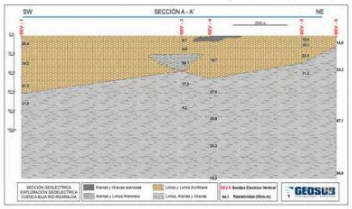


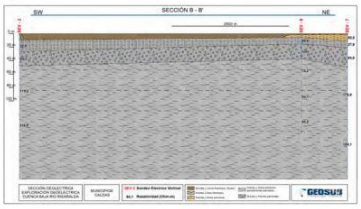


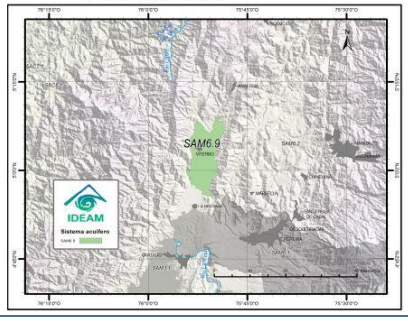




Condicion de puntos de agua y Condiciones generales de los PAS-Bloque diagrama del Acuifero del Rio Risaralda (1).




**Características hidrogeológicas** [1]

El sistema acuífero se ubica en la zona centro-occidente del territorio colombiano, conformada por los municipios de Belalcázar, San José, Viterbo y Anserma.

**Formación hidrogeológica uno-FH1-(sedimentos de Viterbo y Depósitos Aluviales Recientes):** esta unidad comprende las capas superiores de sedimentos que cubren el Valle del Río Risaralda y están conformadas principalmente por intercalaciones de limos, limos arcillosos, limos arenosos, arcillas, arenas, arenas con matriz limosa, gravas y gravas arenosas, con espesores que varían entre los 26,9 metros a los 80,3 metros.

**Formación hidrogeológica dos-FH2-(Formación Zarzal-Formación La Paila):** comprende los sedimentos terciarios que bordean el valle del Río Risaralda y se encontró conformado principalmente por arcillolitas con espesores que varían desde los 0,5 m a 47,7 m.

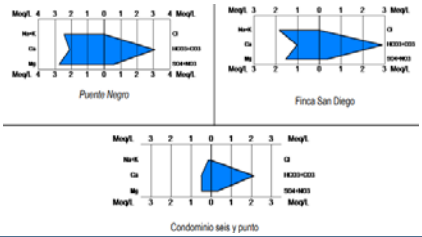
**Formación hidrogeológica tres-FH3-(Formación Colombia):** conformada por sedimentos volcaniclásticos terciarios localizados en la parte alta de la cuenca del Valle del Río Risaralda con espesores entre 1 m a 10 m.

**Formación hidrogeológica cuatro-FH4-(Formación barroso y Gabros de Anserma):** esta unidad comprende el basamento del valle de Río Risaralda, conformada principalmente por basaltos, diabasa, gabros y saprolito; cuenta con espesores entre los 0,5 m a 22,5 m

**Hidroquímica e isotopía** [1]

**Tipo de agua**

Bicarbonata con carácter cálcico-magnésico.




**Redes de monitoreo** [1] **red de monitoreo de agua subterránea de Caldas**

**Puntos de agua subterránea que conforman la red:** 17

- Piezómetros 1
- Aljibes 12
- Manantiales 1
- Pozos 3
- Calidad y Cantidad 17.

**Parámetros monitoreados:**

- **Calidad:** Alcalinidad, pH, COD, SDT, coliformes totales, E.coli, Alcalinidad total, Dureza total, Sulfatos, Nitratos, Cloruros, Turbiedad, Magnesio, Calcio, Conductividad, Temperatura, DBO5, DQO, Nitritos y Fosfatos.
- **Cantidad:** piezometría
- **Frecuencia Calidad:** anual
- **Cantidad:** anual

Fuentes: (1) PMAA - CORPOCALDAS-UTP-GIAS, 2020.

NRI: N.° registra información.

Figura 89. Ficha de información del sistema acuífero SAM 6.9 Río Risaralda
Fuente: Corpocaldas, UTP y GIAS, 2015.

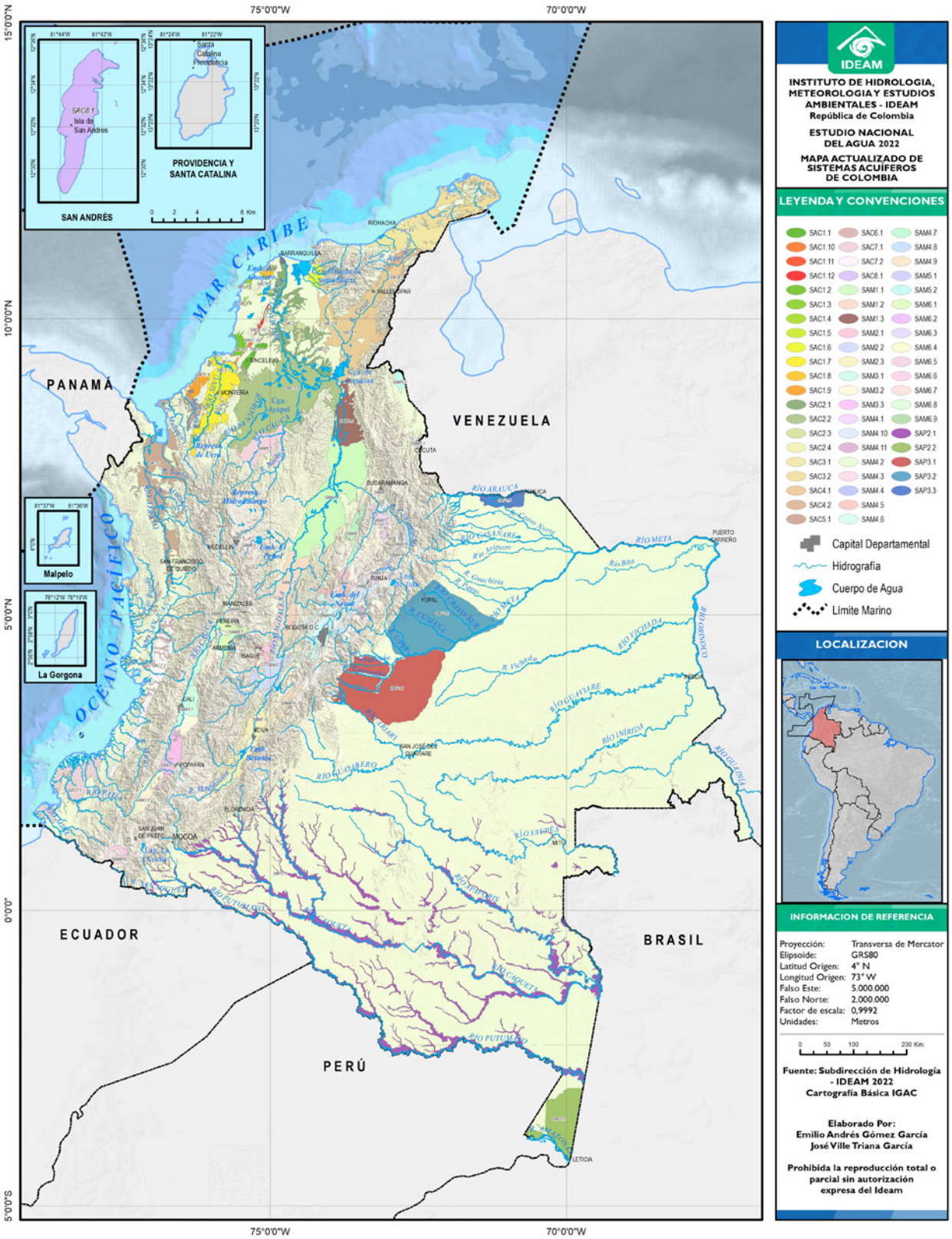



Figura 90. Mapa de los sistemas acuíferos de Colombia 2022.

## 4.4 Consideraciones sobre el monitoreo y evaluación de las aguas subterráneas en Colombia

Actualmente, Colombia no cuenta con información suficiente sobre el uso o la gestión de las aguas subterráneas de su territorio; esto se traduce en que se desconocen aspectos fundamentales como la oferta y la demanda de aguas subterráneas. Esto hace que el estudio de las aguas subterráneas tenga muchas complejidades que, a nivel de país, aún no se tenga claro lo que implican. Unas de esas complejidades es que las aguas subterráneas pueden ser recursos renovables o no renovables. Hay acuíferos o sectores del país donde se extrae agua que no está conectada con el régimen de precipitación actual (acuíferos confinados); son zonas en donde se está haciendo una «minería del agua», porque cada $m^3$ que se explote o se consuma no se va a renovar por procesos naturales. Además, no existe información detallada que permita delimitar o identificar las zonas de recarga de los acuíferos.

El número de autoridades ambientales que dieron respuesta a las solicitudes de información realizadas fue bajo (alrededor de un 55 %). Además, la información reportada sobre nuevos estudios hidrogeológicos adelantados en su jurisdicción es escasa, lo que evidencia la falta de gestión que adelantan en el tema de aguas subterráneas.

Basado en lo anterior, el país tiene la necesidad de acelerar las estrategias para mejorar la información sobre aguas subterráneas con la articulación de entidades; se requieren construir modelos hidrogeológicos conceptuales (MHC) de los sistemas acuíferos existentes. También es preciso contar con un monitoreo de aguas subterráneas (diseñar e implementar redes de monitoreo); este monitoreo debe enmarcarse en los programas institucionales regionales de monitoreo del agua (Pirma) a cargo de las autoridades ambientales, que son las responsables del monitoreo regional del agua y del recurso hídrico en las áreas de su jurisdicción.

Así mismo, es importante resaltar que el monitoreo del recurso hídrico subterráneo debe ser permanente, sistemático y riguroso (atender protocolos de muestreo y seguimiento) para los diferentes actores sociales, gremiales e institucionales.

Los MHC se deben trabajar en articulación con el SGC, como generador de la información del subsuelo en el país, y con el Ideam, como instituto generador de información sobre el monitoreo del recurso hídrico subterráneo. Además, se deben fortalecer los Pirma a cargo de las autoridades ambientales.

Por otra parte, hay limitaciones de consideración con la calidad de la información aportada a través de los inventarios de puntos de agua subterráneas, ya que no se conoce con claridad la cantidad real de puntos de captación, lo que dificulta la determinación de los usuarios y la demanda real del recurso hídrico subterráneo. Se debe mejorar la información aportada por estos inventarios, ya que la mayor parte de estos se limitan únicamente a realizar un conteo o presentar la ubicación de los puntos de captación y dejan de lado aspectos importantes como las unidades hidrogeológicas captadas, la profundidad, condición o el uso de la captación, entre otros.

Estas consideraciones fueron tratadas para consolidar el Programa Nacional de Aguas Subterráneas (PNASUB), que forma parte de la Política Nacional para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (promulgada por el MADS en el 2010). Este programa fue construido con sectores gremiales, institucionales y académicos, y define acciones y estrategias para fortalecer la gestión de las aguas subterráneas en Colombia. Es pertinente destacar —y así se referencia en el documento de este programa— la necesidad de incorporar iniciativas de formación permanente en hidrogeología a niveles técnico, profesional y de posgrado. Así mismo, es indispensable la articulación institucional en el marco de las acciones y estrategias del PNMRH, del Pirma y del PNASUB.



Crédito:
Juan José Montoya Monsalve
Río Timbio. El Tambo - Cauca

# DINÁMICA DE SEDIMENTOS

**Autores:**

**IDEAM:**
Sandra Patricia Salamanca Jiménez
Juan José Montoya Monsalve
Claudia Yaneth Contreras Trujillo

CAPÍTULO 5

# 5. Dinámica de sedimentos

Los sedimentos son material removido de la superficie terrestre por parte de algunos agentes como el agua y el viento, y constituyen un factor clave en la formación de paisajes a largo plazo (Hinderer, 2012). Cuando el agente erosivo es el agua, dependiendo de las características tanto del sedimento como de la superficie, este puede depositarse en la ladera o alcanzar el cauce. Los sedimentos que alcancen el cauce podrán transportarse o no, de acuerdo con las características del material y del cauce. Con el fin de analizar la dinámica de sedimentos en el territorio colombiano se consideran los procesos de producción, de entrega al cauce, y del transporte y del depósito dentro de la red de drenaje, procesos descritos por diferentes autores (Fu et al., 2019).

Estudiar y analizar la dinámica de sedimentos se ha visto como una necesidad, debido a que los cambios o alteraciones en estas dinámicas (de origen natural o antrópico) pueden ocasionar impactos en actividades económicas como la agricultura, los ecosistemas y en la infraestructura (por ejemplo, en la disminución de la vida útil de embalses), entre otros. Analizar la dinámica de sedimentos representa un reto importante debido a la complejidad de los procesos involucrados y a la dificultad de monitorear los sedimentos a escala regional. Teniendo en cuenta lo anterior, se considera que los análisis de dinámica de sedimentos tienen una alta incertidumbre (Camargos et al., 2018; y Efstratiadis y Koutsoyiannis, 2010).

En el capítulo de sedimentos del Estudio Nacional del Agua, se considera un horizonte de análisis de 1 a 50 años de acuerdo con la disponibilidad de la información. En este horizonte de análisis los agentes que controlan los procesos son el clima a corto plazo, el uso y las coberturas del suelo, y los posibles impactos de la actividad antrópica. Se tienen en cuenta procesos de producción, transporte y depósito de sedimentos a escala nacional. En este análisis, la principal fuente de producción de sedimentos es la erosión hídrica potencial; por su parte, el transporte y el depósito de sedimentos se consideran en ladera y en cauce.

## 5.1 Conceptos y metodología

Al analizar el ciclo de sedimentos en una cuenca hidrográfica, se identifican tres procesos generales: la producción, el transporte y el depósito. Cada uno de estos es predominante dependiendo de la localización dentro de la cuenca. De manera general, se puede considerar que en la zona alta de las cuencas el proceso predominante es la producción de sedimentos por medio de la erosión del suelo; en la zona media de la cuenca predomina el transporte; y en la zona baja, el depósito (Figura 91).

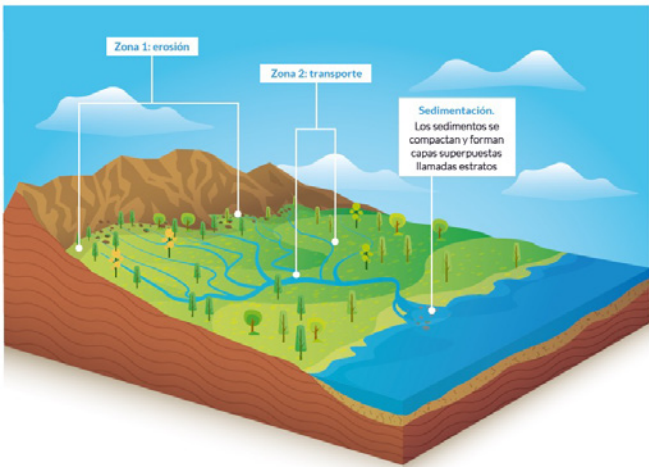



Figura 91. Procesos del ciclo de sedimentos predominantes dentro de una cuenca hidrográfica. Tomada de: Ideam, 2018.

Las escalas espaciales que se tienen en cuenta en este capítulo corresponden a los elementos fundamentales de una cuenca hidrográfica: las laderas donde predominan procesos de producción de sedimentos debido a la erosión del suelo y los cauces donde sobresale el proceso de transporte de sedimentos; en ambos casos se consideran depósitos de sedimentos. En cuanto a las escalas temporales, se tiene en cuenta un horizonte de análisis de 1 a 50 años de acuerdo con la disponibilidad de la información.

La Figura 92 presenta, de manera esquemática, el marco conceptual y metodológico donde los procesos se discretizan teniendo en cuenta el lugar de la cuenca donde ocurren, en ladera o en cauce, y el tipo de proceso que se representan: producción, transporte o depósito.

*En ladera* se tienen en cuenta procesos de producción de sedimentos debido a la erosión hídrica potencial; también se evalúa la conectividad de la ladera por medio de un índice de conectividad, el cual presenta la probabilidad de que el material que pasa por un punto determinado llegue al cauce o a una zona de depósito.

*En cauces* se analizan tanto el transporte como el depósito de sedimentos. Se calcula el rendimiento de sedimentos para las estaciones hidrológicas de la red básica del Ideam con datos disponibles, realizando un análisis de las series mensuales. Después, considerando los posibles aportes de sedimentos por ladera, se hace un balance de sedimentos en cada tramo de la red de drenaje teniendo en cuenta la relación de entrega en ladera y las características de la red de drenaje. Este análisis permite estimar rendimiento de sedimentos a nivel nacional, en zonas instrumentadas y no instrumentadas.

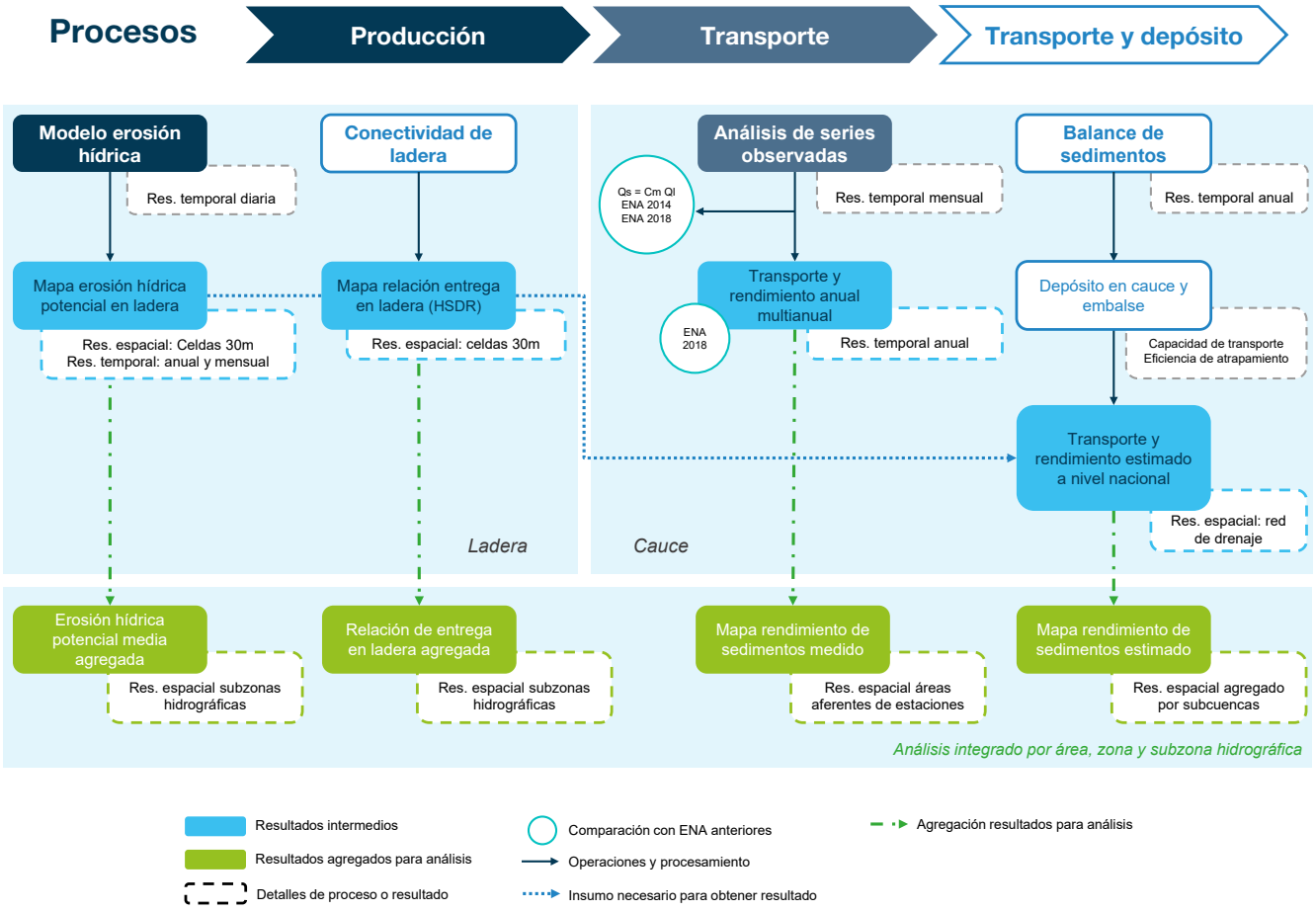



Figura 92. Esquema marco metodológico y conceptual.

Considerando el marco conceptual y metodológico, se definen las fuentes de información requeridas, las cuales están disponibles para todo el territorio nacional. La información consultada para el análisis de la dinámica de sedimentos se relaciona en la Tabla 37, donde se presenta la fuente de la cual fue obtenida la información, la escala o resolución que tiene y en qué proceso específico es usada como insumo.

Tabla 37. Descripción de la información base empleada en el análisis.

| Descripción | Fuente | Escala o resolución | Procesos donde se emplea |
|---|---|---|---|
| Modelo de elevación digital | IGAC-USGS | Celdas: 30 m | Modelo erosión hídrica<br>Conectividad de ladera<br>Balance de sedimentos |
| Mapa de suelos | IGAC | 1:100.000 | Modelo erosión hídrica |
| Estudios generales de suelos departamentales | IGAC | 1:100.000 | Modelo erosión hídrica |
| Coberturas de la Tierra 2018 | IDEAM | 1:100.000 | Modelo erosión hídrica<br>Conectividad de ladera |
| Mapas de escorrentía diaria | IDEAM | Celdas: 5 km | Modelo erosión hídrica |
| Mapa de zonas potencialmente inundables y cuerpos de agua | IDEAM | 1:100.000 | Balance de sedimentos |
| Series de transporte, concentración y caudal líquido | IDEAM | Mensual | Análisis de series observadas<br>Balance de sedimentos |
| Series de caudal en embalses | XM | Diario | Balance de sedimentos |
| Volumen de embalses | CNO | N.A. | Balance de sedimentos |

A continuación, se describen, con mayor detalle, los procesos que se tienen en cuenta dentro del análisis:

### 5.1.1 Procesos en ladera

Los procesos erosivos en ladera se estiman a partir del modelo propuesto por Kilinc y Richardson (1973) modificado por Julien et al. (1995). Esta expresión (Qs) tiene en cuenta el potencial erosivo de la escorrentía superficial (q), características topográficas representadas por la pendiente (S), parámetros de la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE, por sus siglas en inglés) que representan la erodabilidad del suelo (K), la cobertura (C) y las prácticas de manejo (P). Los mapas de escorrentía diaria se estiman en el componente de oferta hídrica del actual Estudio Nacional del Agua, el mapa de pendientes se valora usando un modelo digital del terreno de 30 metros (IGAC-USGS), el mapa de erodabilidad del suelo es función de las características del suelo y conserva el estimado para el ENA 2018, y los mapas de cobertura y prácticas de manejo son valorados a partir del mapa de Coberturas de la Tierra del año 2018 (Ideam et al., 2021). Para estimar los tres últimos mapas se tienen en cuenta los criterios presentados en el documento «Lineamientos generales para el manejo de sedimentos a nivel de cuenca hidrográfica en el marco de la Gestión Integral del Recurso Hídrico» (Minambiente, 2022).

La resolución temporal usada en este análisis es diaria y se acerca a la escala característica de los procesos erosivos de mayor magnitud, los cuales se caracterizan por estar relacionados con eventos de intensidades altas y de poca duración. En la Figura 93, se presentan los mapas calculados y la expresión usada para estimar la erosión potencial hídrica; en estos mapas, el color rojo está asociado con una mayor susceptibilidad a la erosión; y el verde, con menor susceptibilidad a la erosión. En el caso de la escorrentía, se presenta el mapa correspondiente a un paso de tiempo.

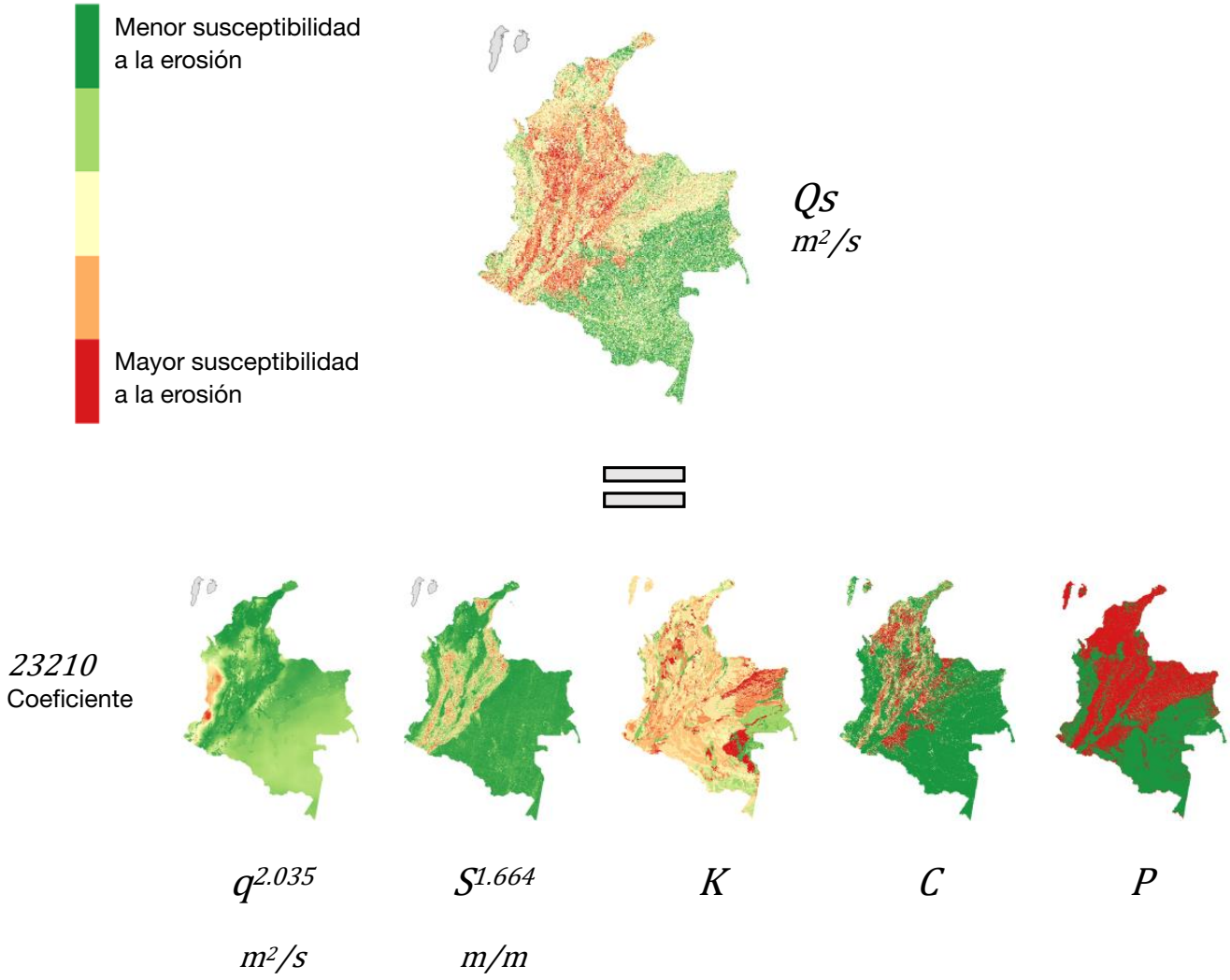



Figura 93. Mapas calculados para estimar valores de erosión potencial hídrica.

Por otro lado, para estimar la conectividad de cada elemento de la ladera con el cauce se usan índices de conectividad, los cuales se calculan a partir de la configuración topográfica del terreno y de la disposición espacial de los procesos hidrogeomorfológicos que controlan las tasas de transporte de agua y sedimentos. El índice de conectividad (IC) empleado (Borselli et al., 2008) representa la conectividad potencial entre diferentes sectores de una cuenca. Conceptualmente, dicho índice considera la probabilidad de que el sedimento pueda llegar a un sumidero B (red de drenaje o depósito) desde una posición específica A.

En la Figura 94, se presenta de manera esquemática el cálculo del índice de conectividad para una zona determinada, donde drena un área (A), tiene una distancia al cauce o zona de depósito (d), una pendiente para cada unidad (S) y un peso (w). Tanto la pendiente (S) como el peso (w) presentan valores superiores cuando se tiene una mayor conectividad; siendo así, el peso está asociado con características del suelo y de las coberturas; se puede considerar que entre más resistente sea el suelo a la erosión este tendrá una menor conectividad. Teniendo en cuenta lo anterior, se emplea como peso el factor C de co-

bertura de la USLE, dado que este tiene valores mayores cuando la cobertura favorece los procesos erosivos.

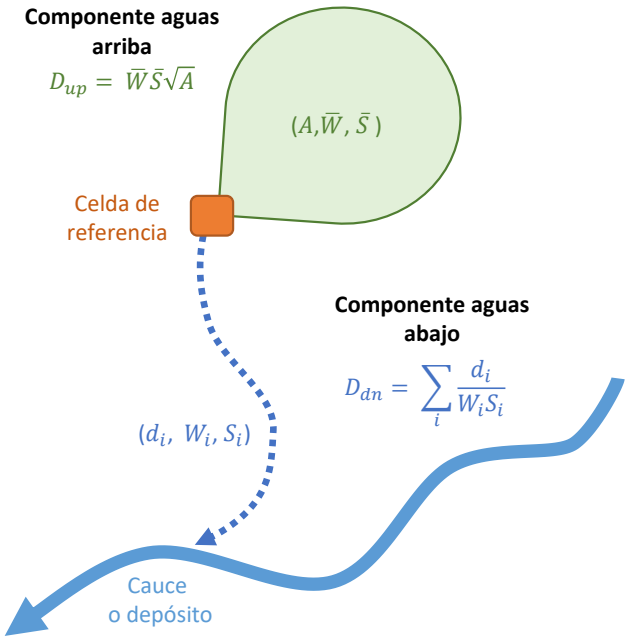



Figura 94. Esquema índice de conectividad. Adaptado de Borselli et al. (2008).

Los resultados del índice de conectividad se regionalizan con la relación de entrega de ladera (HSDR, por sus siglas en inglés, Hillslope Delivery Ratio) el cual varía de 0 a 1, donde 1 representa mayor conectividad, y 0, las zonas sin conectividad o zonas de depósito. Calculado este factor y conociendo la erosión potencial hídrica, se estiman zonas potenciales de depósito en ladera, así como zonas con alta probabilidad de transporte; y también se valora el porcentaje del volumen de sedimentos originado en ladera con capacidad de llegar al cauce o a la zona de depósito más cercana. Las áreas donde se tienen valores elevados de este factor serán aquellas donde el uso del suelo y las actividades que en él se realicen pueden repercutir en las características del recurso hídrico aguas abajo.

### 5.1.2 Procesos en cauce

El rendimiento de sedimentos en cauces se calcula en estaciones de la red básica del Ideam. El rendimiento de sedimentos se define como «la cantidad de sedimentos que pasa por un punto de control en un tiempo determinado sobre el área de la cuenca aferente a este punto»; este tiene unidades de masa sobre tiempo por área [M/T*A]. El cálculo de transporte de sedimentos se realiza a partir de una ecuación exponencial que relaciona el caudal sólido (Qs) con el caudal líquido (Ql); dichas ecuaciones se calculan a partir de aforos realizados en estaciones de la red básica del Ideam. Si bien, este rendimiento no da detalles espaciales de los procesos que ocurren dentro de su área afrente, proporciona un valor variable en el tiempo que permite evaluar posibles cambios en la cuenca que drena a la estación.

Por otro lado, para evaluar la capacidad de transporte, la potencia de la corriente es un factor determinante. Con el uso de la ecuación de Yang simplificada (Wilkinson et al., 2006), la cual se basa en la potencia, se caracterizará cada tramo de la red de drenaje y se estimará su capacidad de transporte. Este cálculo se aplica para toda la red de drenaje; por ende, permite obtener valores estimados en zonas no instrumentadas; y en las zonas instrumentadas permite hacer una revisión de resultados. Para implementar la ecuación de Yang adicional a la escorrentía es necesario estimar una geometría del cauce; en este análisis se usa geometría hidráulica, la cual relaciona la geometría del cauce con el caudal de acuerdo con la tipología de corriente (MADS, 2017).

Estimada la conectividad en ladera y la capacidad de transporte de la red de drenaje, se adopta un balance de sedimentos por tramos similar al propuesto en el modelo SedNET (Wilkinson et al., 2009). En cada tramo de la red de drenaje se tienen entradas de material, posibles almacenamientos y material transportado (Figura 95). En este análisis se hace referencia a los tramos como las zonas del cauce comprendidas entre dos confluencias.

En el balance se tienen en cuenta dos entradas de material: una relacionada con el material proveniente de las laderas aledañas y la otra el material transportado por cauces tributarios; en ambas, el proceso de producción es la erosión hídrica. Para evaluar el depósito en los tramos, se tienen en cuenta la capacidad de transporte en el cauce y la retención de sedimentos en embalses, calculada según la eficiencia de atrapamiento (porcentaje de sedimentos

retenidos en el embalse, en donde se contaba con información) (Jothiprakash y Vaibhav, 2008; y Mulu y Dwarakish, 2015). Finalmente, el material transportado por el tramo es la diferencia entre el material que entra y el material depositado.

Con base en este balance de sedimentos se estima de manera cualitativa la capacidad de trasportar o no hasta un punto determinado de la red de drenaje, generando un mapa de rendimientos estimados a nivel nacional. Los resultados se presentan de manera cualitativa, dada la poca disponibilidad de datos en el país para calibrar el modelo.

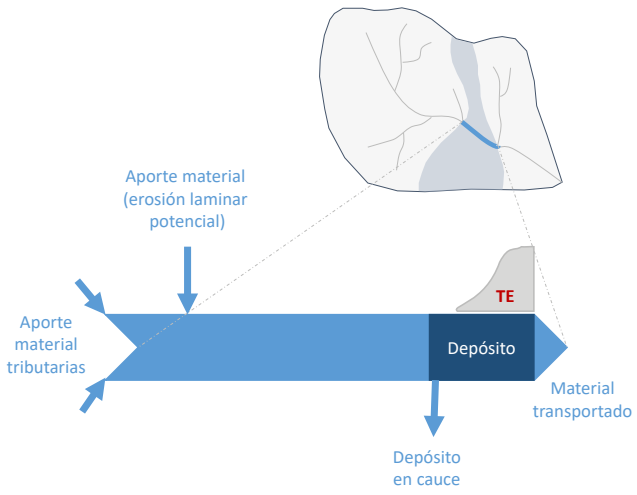



Figura 95. Esquema simplificado de balance de sedimentos
Adaptado de Wilkinson et al. (2009).

## 5.2 Resultados y análisis para el territorio nacional

Se presentan aquí los resultados de los análisis realizados a nivel nacional en ladera y en cauce de erosión hídrica potencial, de relación de entrega en ladera, y de rendimiento de sedimentos calculado a partir de series observadas y de rendimiento de sedimentos estimado a partir de balance de sedimentos. También se presentan comparaciones con datos presentados en los ENA anteriores en donde resulta apropiado realizar la comparación.

### 5.2.1 Erosión hídrica potencial

En el análisis de erosión hídrica potencial se muestran una serie de mapas que representan la escorrentía diaria promedio del periodo comprendido entre 1982 y 2021. Los resultados de erosión hídrica potencial diaria se agregan de manera mensual promedio multianual (Figura 96). Se conservan los rangos de valores anuales presentados en el ENA 2018 y se agregan rangos de valores mensuales (Tabla 38).

Los resultados agregados por subzona hidrográfica (surgidos a partir de medias zonales) de la erosión hídrica potencial medio mensual se presentan en la Figura 97; en esta se evidencian tres subzonas con erosión hídrica potencial muy severa los 12 meses del año: dos en el área hidrográfica Magdalena-Cauca: Río Salado y otros directos al Cauca y Río Timba; y una en el área hidrográfica Pacífico, Río San Juan del Micay.

Tabla 38. Rangos adoptados para la erosión hídrica potencial en ladera, adaptado de Ideam (2018).

| Rango | Valores a escala de celda ($m^3$/año) | Denudación (mm/año) | Valores medios en subzonas ($m^3$/año) | Valores a escala de celda ($m^3$/mes) | Valores medios en subzonas ($m^3$/mes) |
|---|---|---|---|---|---|
| Sin evidencia | 0 – 0.001 | 0 – 0.0001 | 0 – 2 | 0 – 0.0001 | 0 – 0.2 |
| Ligera | 0.001 – 0.1 | 0.0001 – 0.01 | 2 – 10 | 0.0001 – 0.01 | 0.2 – 1.0 |
| Moderada | 0.1 – 10 | 0.01 – 1.0 | 10 – 25 | 0.01 – 1.0 | 1.0 – 2.5 |
| Severa | 10 – 100 | 1.0 – 10.3 | 25 – 100 | 1.0 – 10.0 | 2.5 – 10.0 |
| Muy severa | > 100 | > 10.3 | > 100 | > 10.0 | > 10.0 |

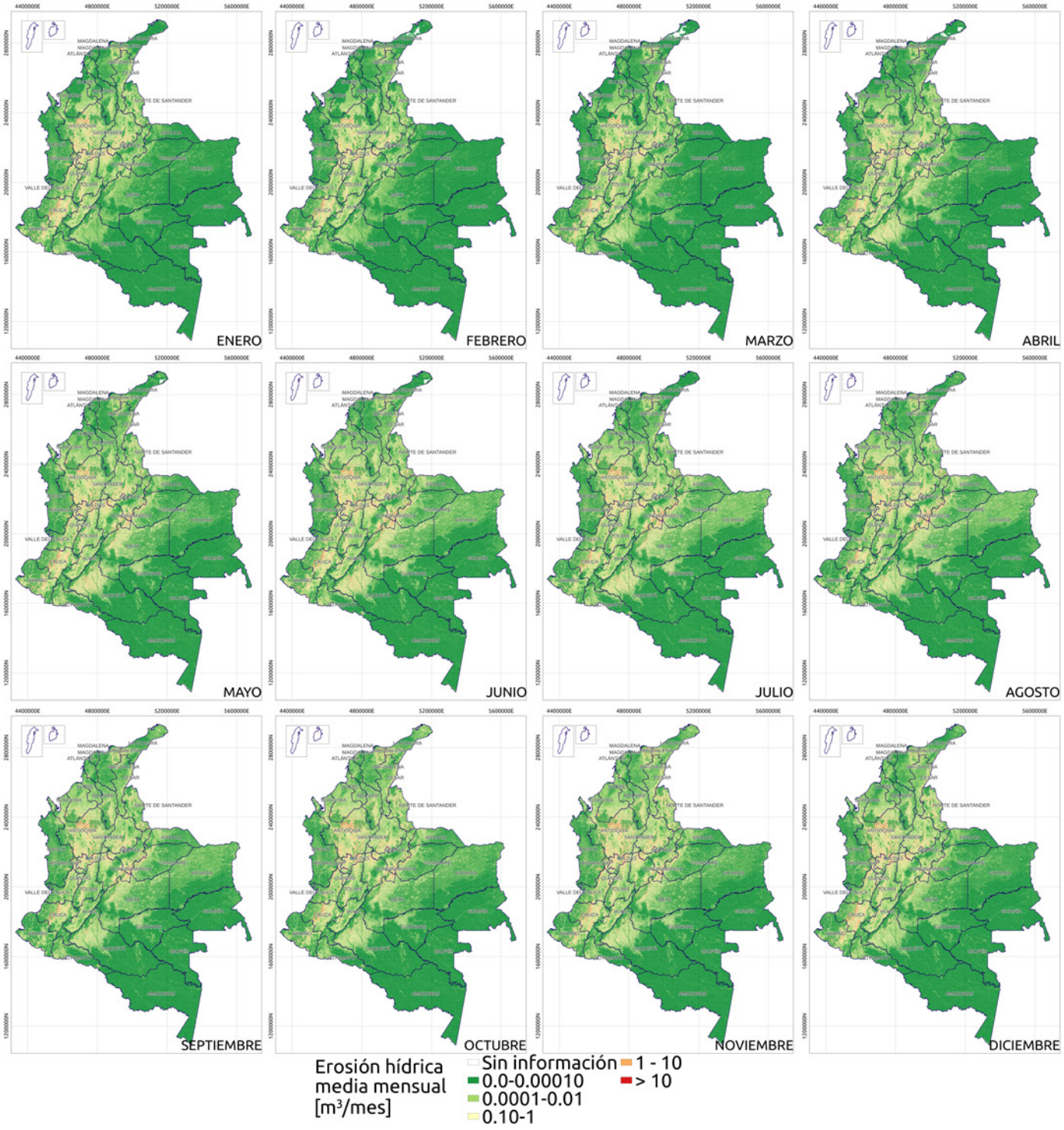



Figura 96. Mapas mensuales de erosión hídrica potencial, distribuidos en celdas de 30 m.

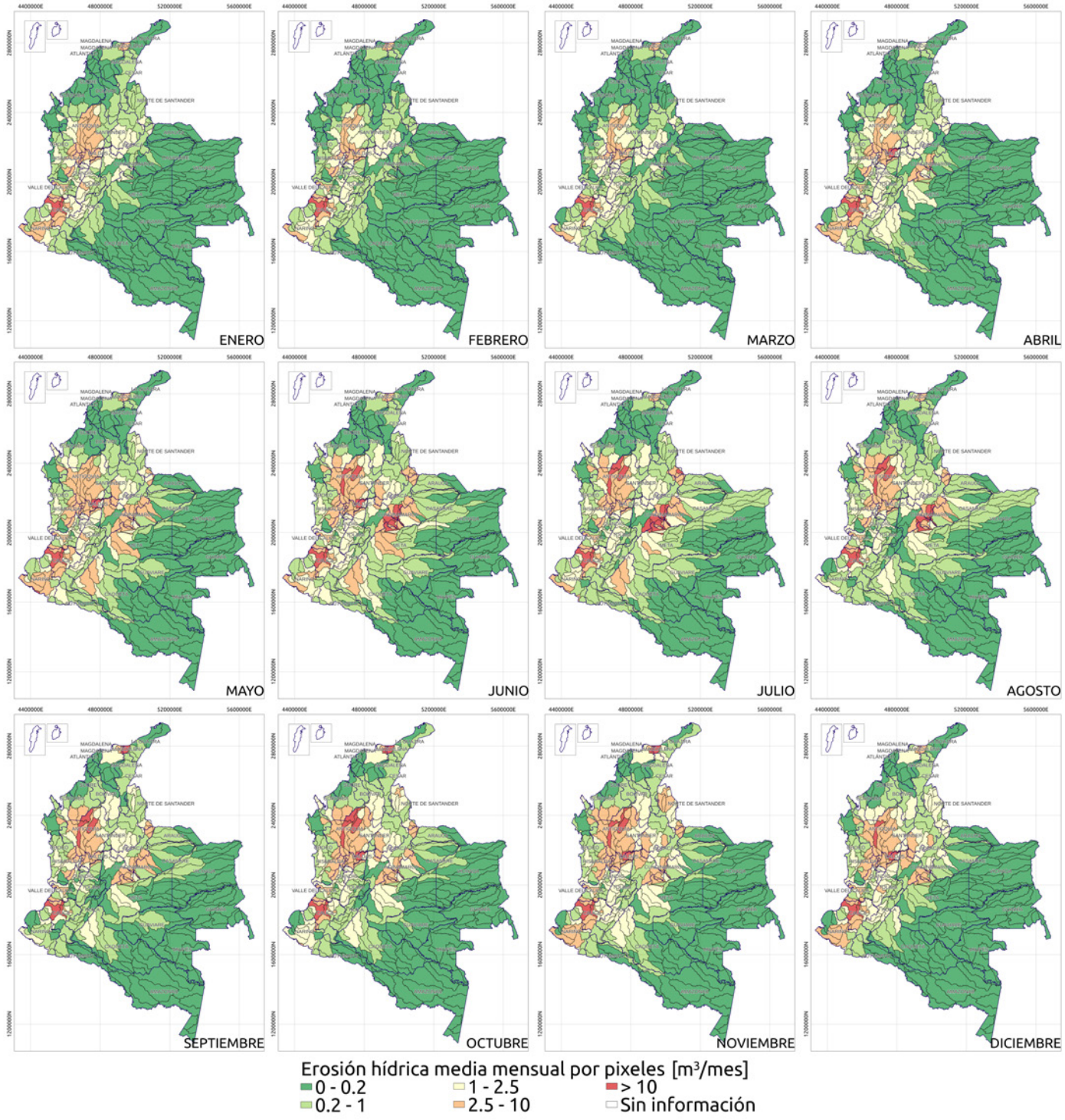



Figura 97. Mapas mensuales de erosión hídrica potencial agregados por subzona hidrográfica.

La Figura 98 muestra la variabilidad anual promedio multianual de la erosión hídrica potencial presentando el número de subzonas hidrográficas en cada uno de los rangos adoptados. En esta gráfica se evidencia que los meses con mayor erosión hídrica potencial en el país son junio, julio, agosto, octubre y noviembre, mientras que los meses con menor erosión hídrica potencial son febrero, marzo y septiembre.

Al sumar los valores medios de erosión hídrica potencial mensual se obtiene el mapa de erosión hídrica potencial media anual multianual; este mapa se presenta de manera distribuida y agregada en la Figura 99; en la agregación se tiene en cuenta el valor medio de erosión en cada subzona hidrográfica. En el mapa se observan seis subzonas con erosión hídrica potencial muy severa: cinco localizadas en el área hidrográfica Magdalena-Cauca, río Salado y otros directos al Cauca, Río Timba, Río La Miel (Samaná), Directos al río Cauca entre río San Juan y Puerto Valdivia y Alto Nechí; y una subzona localizada en el área hidrográfica Pacífico, Río San Juan del Micay.

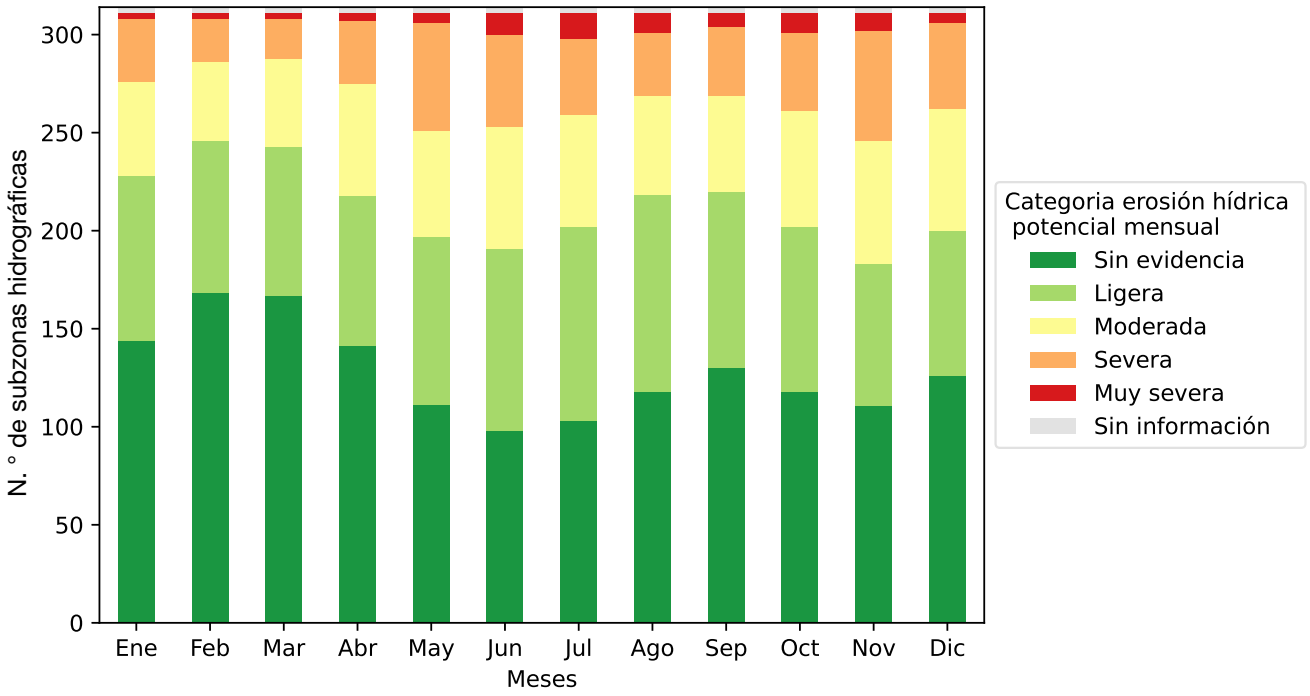



Figura 98. Variabilidad anual de la erosión hídrica potencial, número de subzonas en cada categoría para cada mes.

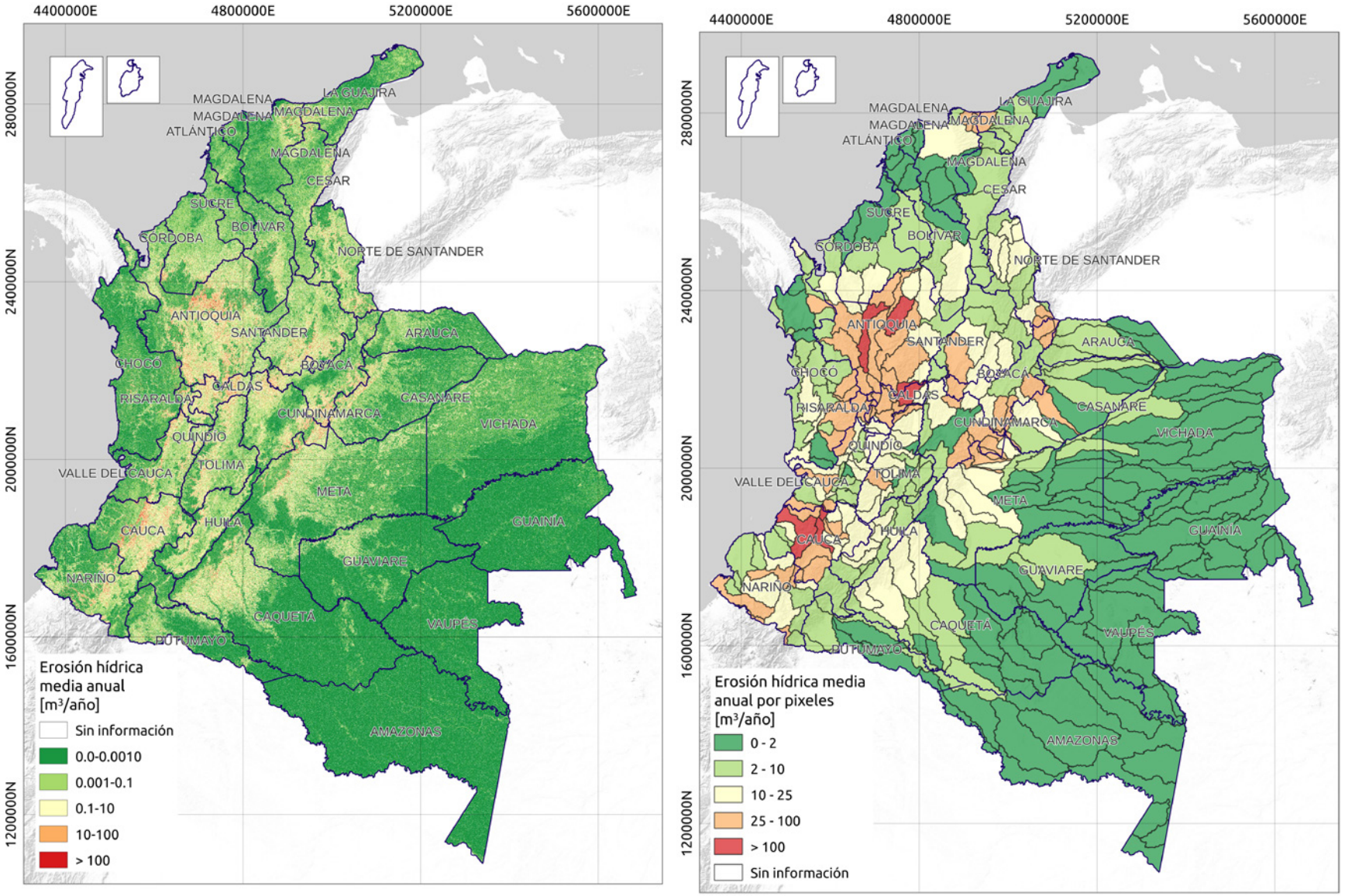



Figura 99. Mapa de erosión hídrica potencial: a la izquierda distribuido en celdas de 30 m y a la derecha agregado por subzonas hidrográficas.

En la Figura 100, se presenta la distribución de la erosión hídrica potencial anual multianual en las áreas hidrográficas, presentando el número de subzonas hidrográficas localizadas en cada rango definido. Se evidencia que el área Magdalena-Cauca tiene mayor número de subzonas con una erosión muy severa, mientras que en el área Pacífico, 11 de sus 33 subzonas presentan una erosión severa o muy severa. Por otro lado, las áreas Caribe, Orinoquía y Amazonía no presentan subzonas dentro del rango muy severo de erosión.

Los resultados de la erosión hídrica potencial muestran que las subzonas con erosión hídrica severa y muy severa se localizan principalmente en la parte alta del Magdalena-Cauca y en zonas de piedemonte localizadas en las áreas Caribe, Orinoco, Amazonas y Pacífico. Por otra parte, la erosión ligera y muy ligera es predominante en zonas bajas del Magdalena-Cauca y en las zonas planas de la Orinoquía y la Amazonía. En el caso del Pacífico, más de la mitad de las subzonas tienen erosión moderada, severa o muy severa. En el **Anexo 5a** se presenta cada subzona con el rango de erosión anual y mensual.

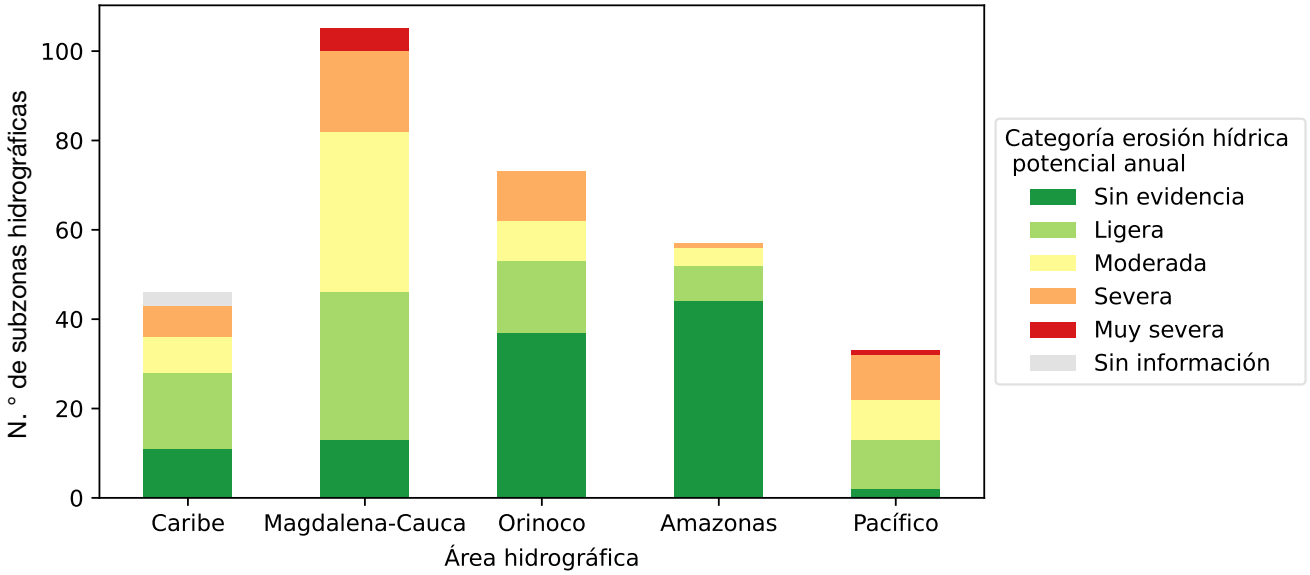



Figura 100. Subzonas en cada rango de erosión hídrica potencial por área hidrográfica.

## 5.2.2 Relación de entrega en ladera

La Figura 101 muestra los resultados de la relación de entrega en ladera a nivel nacional, de manera distribuida en celdas de 30 m y agregado teniendo en cuenta la media por subzonas hidrográficas. Los valores superiores representan una mayor probabilidad que el material producido en esa área llegue a cauce o a una zona de depósito aguas abajo.

En la Figura 102, se presenta la distribución de la relación de entrega en ladera en las áreas hidrográficas, con el número de subzonas hidrográficas localizadas en cada rango definido. En las áreas Caribe y Pacífico se encuentran más subzonas con una muy alta conectividad; y, en las áreas Caribe y Amazonía, ninguna subzona registra relación de entrega en ladera muy alta.

En general, se observa que en zonas con pendientes altas y medias se tiene una relación de entrega alta, mientras que en zonas planas se presentan valores bajos. En la zona alta y media del Magdalena-Cauca, así como en los piedemontes, se observan relaciones de entrega alta o muy alta, mientras que en zonas de baja pendiente, como las llanuras de la Orinoquía y la Amazonía, se presentan relaciones de entrega predominantemente bajas y muy bajas. En el **Anexo 5b**, se puede consultar cada subzona con el valor y el rango de relación de entrega en ladera.

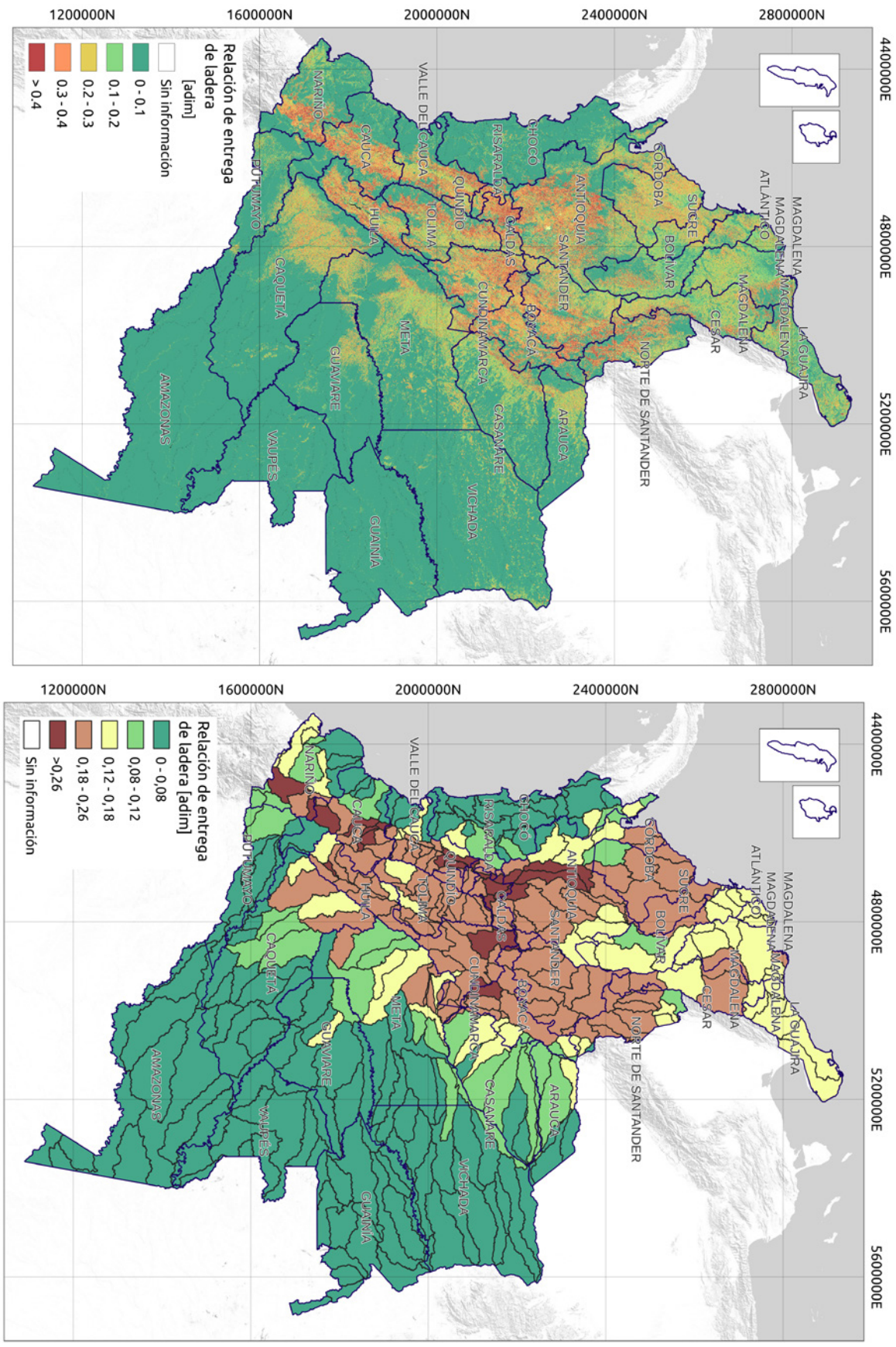



Figura 101. Mapa de erosión hídrica potencial en ladera: a la izquierda distribuido en celdas de 30 m y a la derecha agregado por subzonas hidrográficas.

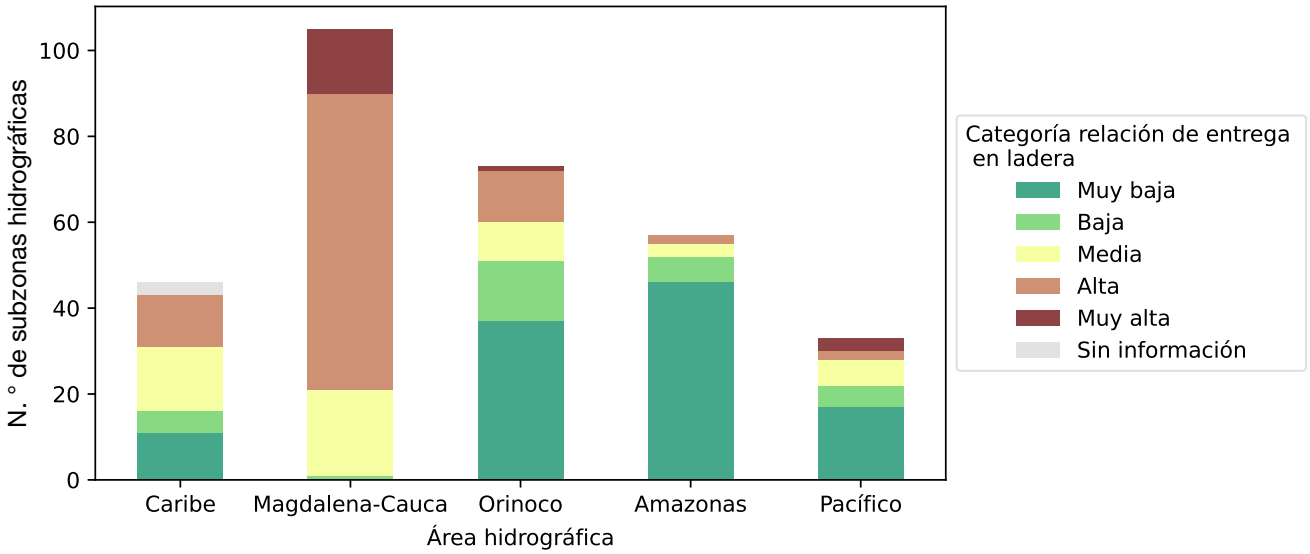



Figura 102. Subzonas en cada rango de relación de entrega en ladera por área hidrográfica.

### 5.2.3 Rendimiento de sedimentos estimado a partir de datos observados

Los resultados de rendimiento medio anual multianual a nivel nacional en las estaciones de la red básica del Ideam se agrupan en rangos cualitativos; se conservan los rangos presentados en el ENA 2018 basados en información de cuencas de diversos tamaños y características (Ideam, 2019). La Figura 103 muestra la distribución por categorías de los rendimientos tanto en áreas como en número de estaciones. Esta gráfica evidencia que la mayor parte de las estaciones presentan rendimiento muy bajo y son pocas las que tienen rendimientos muy altos (8 estaciones); además, estas ocho estaciones tienen áreas aferentes menores que 6000 km$^2$.

La Figura 104 presenta la variabilidad espacial del rendimiento de sedimentos asociada al área aferente a cada una de las estaciones; los rangos definidos se presentan en las convenciones del mapa.

En las áreas hidrográficas Caribe, Orinoquía, Amazonía y Pacífico hay zonas sin información dado que no se tienen registros de transporte de sedimentos para estimar rendimientos. En el **Anexo 5c** se puede consultar la tabla con la información correspondiente de cada estación analizada.

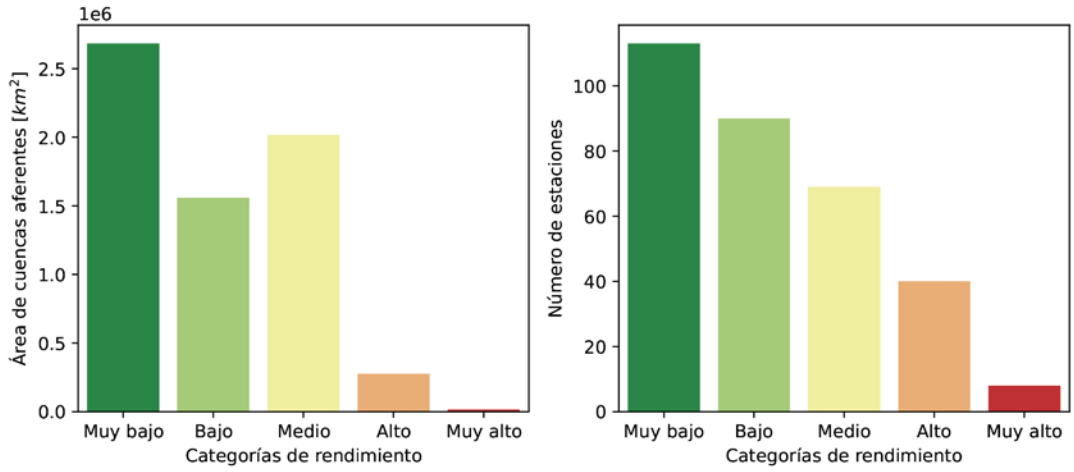



Figura 103. Distribución por categorías del rendimiento de sedimentos tanto por áreas como por número de estaciones.

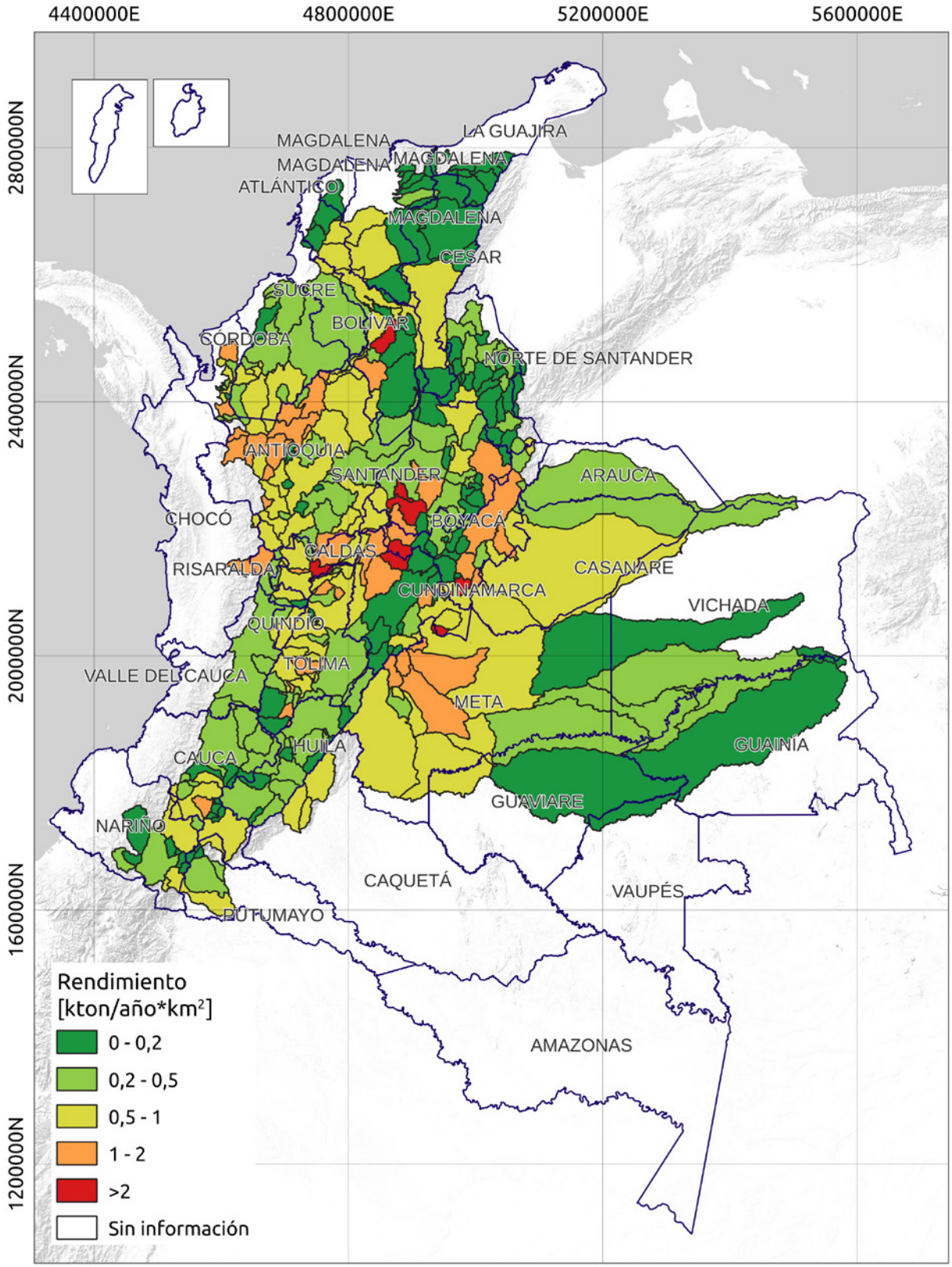



Figura 104. Rendimiento de sedimentos de las cuencas aferentes a las estaciones analizadas.

## Comparación datos analizados en los ENA 2014, 2018 y 2022

En el ENA 2014 (Ideam, 2015), el transporte de sedimentos se estimó teniendo en cuenta el producto de caudal líquido y concentración media de sedimentos. En el ENA 2018 (Ideam, 2019), se compararon los resultados y evaluaron diferencias en 42 estaciones, donde se tenía información completa para al menos un año adicional a los revisados en 2014. De estas 42 estaciones, solo en cinco se encuentran datos completos para al menos un año adicional a los analizados en el ENA 2018. La Tabla 39 muestra las estimaciones de transporte y diferencias para las cinco estaciones.

Por otra parte, se comparan los rendimientos estimados en estaciones con los del ENA 2018. La Figura 105 muestra: en las ordenadas, la categoría de rendimiento de sedimentos estimada a partir de los datos registrados para el ENA 2018; y en las abscisas, la categoría de rendimiento de sedimentos estimada a partir de los datos registrados para el ENA 2022. El mapa de color representa el número de estaciones que cambian de una categoría a otra: el color verde indica menor número de estaciones y el amarillo mayor número de estaciones. En esta comparación se incluyeron solo aquellas estaciones donde se dispone de al menos un año adicional de información (203 estaciones). La mayoría de las estaciones se localiza en la diagonal, lo que significa que permanecen en la misma categoría de rendimiento que en el ENA 2018; solo dos estaciones tienen un cambio de dos categorías: en el ENA 2018 registraban un rendimiento muy bajo y, con los datos de 2022, el rendimiento es medio. Este incremento está relacionado con cambios realizados a las ecuaciones exponenciales que relacionan el caudal líquido y el caudal sólido. Además, estos incrementos pueden deberse a cambios en el régimen de precipitación y al incremento de zonas deforestadas con fines agrícolas y agrarios.

Tabla 39. Comparación del transporte de sedimentos en suspensión entre valores del ENA 2018 y el ENA 2022.

| Código | Nombre estación | Cambio porcentual ENA 2018 - ENA 2014 | Periodo con datos ENA 2018 | | Transporte medio anual multianual (kton/año) ENA 2018 | Periodo con datos ENA 2022 | | Transporte medio anual multianual (kton/año) ENA 2022 | Años nuevos | Cambio porcentual ENA 2022 - ENA 2018 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 13077060 | Cotoca Abajo | 5,8 | 1985 | 2012 | 2339,8 | 1985 | 2020 | 1711,2 | 8 | -26,9 |
| 21027010 | Pericongo | -2,8 | 1981 | 2013 | 1481,5 | 1981 | 2018 | 1472,8 | 5 | -0,6 |
| 21057060 | Paicol | -6,0 | 1974 | 2013 | 2477,0 | 1974 | 2018 | 2454,2 | 5 | -0,9 |
| 26177030 | La Virginia Automática | 6,2 | 1973 | 2011 | 9354,7 | 1973 | 2019 | 8846,6 | 8 | -5,4 |
| 44017070 | Santa Rosa | -46,2 | 1996 | 2012 | 43,0 | 1996 | 2016 | 44,6 | 4 | 3,6 |

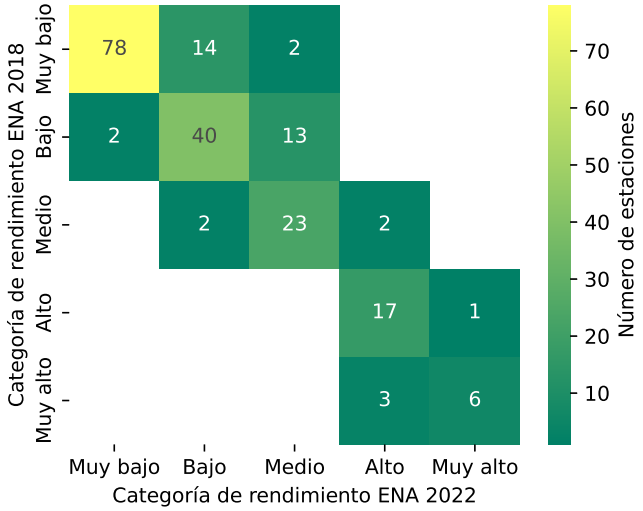



Figura 105. Cambios en rendimiento de sedimentos en estaciones con al menos un año de información adicional.

## 5.2.4 Rendimiento de sedimentos estimado a partir de balance de largo plazo

La Figura 106 compara los valores de rendimiento estimados a partir de datos observados en estaciones con los rendimientos estimados realizando balance de sedimentos de largo plazo. En la gráfica, la línea gris representa un ajuste ideal del modelo de balance de sedimentos; sin embargo, se evidencia que los valores estimados con balance tienden a sobreestimar los observados; debido a esto, se usa un factor de ajuste para escalar los resultados y que así sean comparables con los rangos de rendimiento presentados anteriormente.

El mapa de rendimiento cualitativo para el territorio nacional se obtiene usando el factor de escalamiento. En la Figura 107 se presenta el mapa de rendimiento estimado con balance de sedimentos de largo plazo, agregado para corrientes de orden 1 a la izquierda y de orden 5 a la derecha. El mapa se relaciona con el mapa de erosión hídrica potencial, dado que este es el principal insumo del mapa de rendimiento.

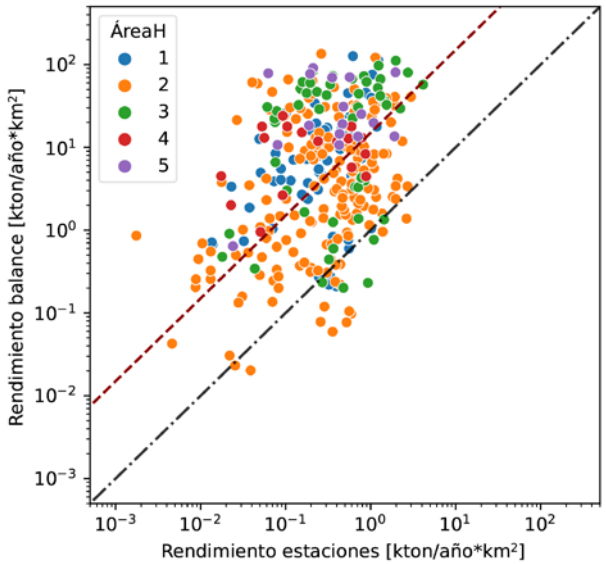



Figura 106. Comparación de datos de rendimientos estimados con estaciones y estimados a partir de balance de sedimentos.

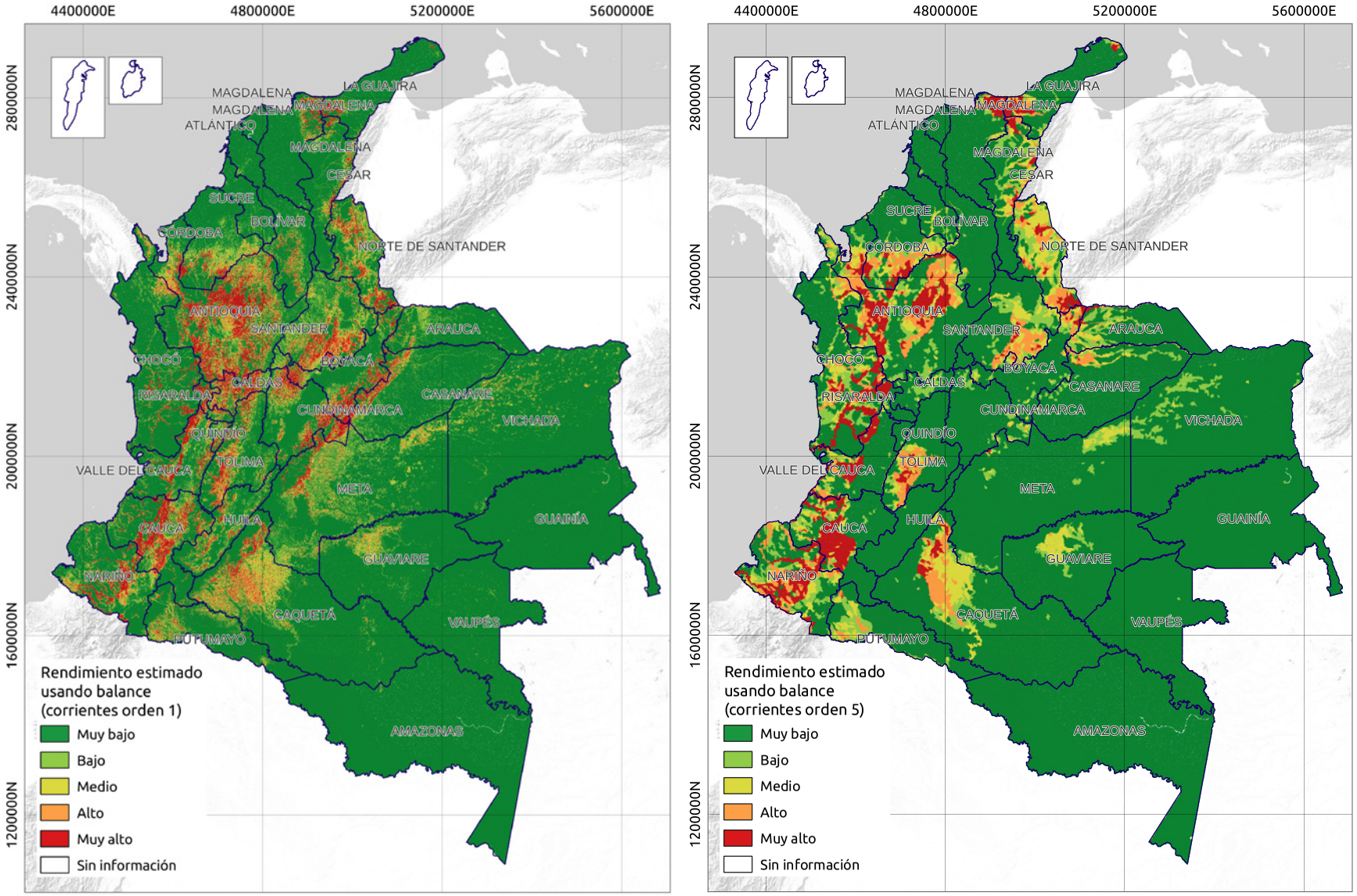



Figura 107. Mapa de rendimiento estimado a partir de balance de sedimentos de largo plazo.

El análisis de balance de sedimentos representa la conectividad en el territorio, por lo que para agregar sus resultados se debe tener en cuenta la configuración topológica de la red de drenaje. Debido a lo anterior, no se agregan los resultados por subzona hidrográfica. La variabilidad espacial del rendimiento de sedimentos por área hidrográfica se presenta en la Figura 108; en esta se observa que la Amazonía y la Orinoquía tienen rendimientos menores, mientras que el área Magdalena-Cauca presenta mayores rendimientos. En el caso del área del Pacífico se observan rendimientos altos en un porcentaje bajo de su área.

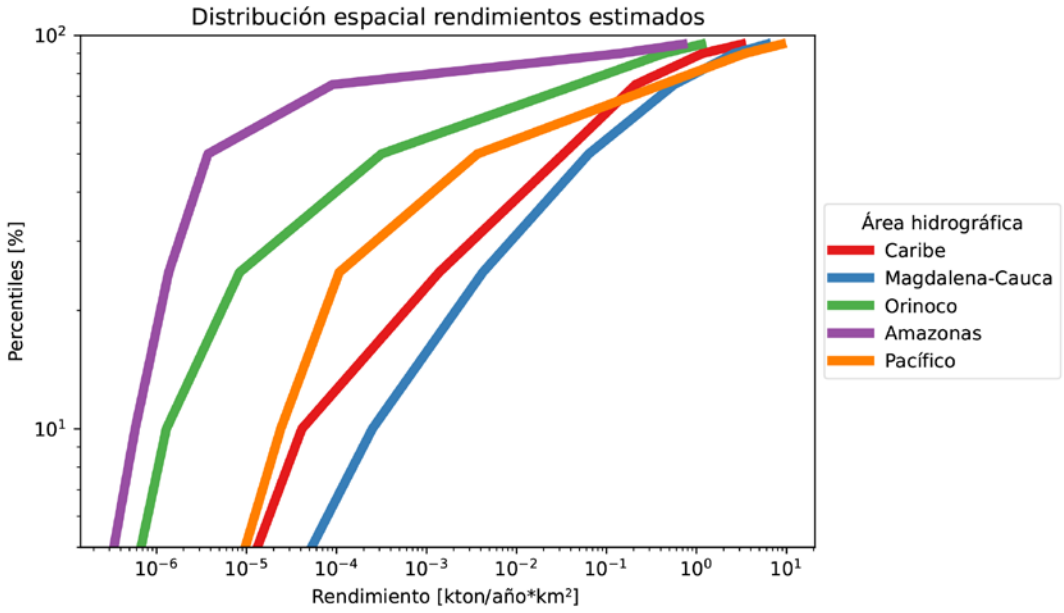



Figura 108. Distribución espacial de rendimiento de sedimentos estimado a partir de balance.

## 5.3 Análisis integrado de sedimentos por área hidrográfica

En esta sección, se presentan los análisis que integran los resultados del rendimiento de sedimentos (medido en estaciones y estimado con balance) con la relación de entrega en ladera y la producción de sedimentos estimada con erosión hídrica potencial para cada área hidrográfica. En las zonas y subzonas hidrográficas con datos medidos de rendimiento de sedimentos se determinan posibles causas de estos valores.

### 5.3.1 Área hidrográfica Caribe

En el área hidrográfica Caribe se presenta erosión hídrica potencial severa y muy severa en las zonas Atrato-Darién y Caribe-Guajira. Se resaltan en la zona Caribe-Guajira las subzonas Río Ancho y otros directos al Caribe y Río Don Diego, en donde en al menos un mes se presenta erosión muy severa. Los meses de febrero y marzo muestran una menor erosión, mientras que octubre y noviembre una mayor erosión (Figura 109).

En las zonas Caribe litoral, Sinú y Catatumbo, se presenta erosión moderada, ligera y sin evidencia; en el caso del Catatumbo, predomina la erosión moderada; mientras que en el Caribe litoral predominan las subzonas sin evidencia de erosión. En el caso de las Islas Caribe no se cuenta con la información mínima necesaria para estimar erosión hídrica potencial, por lo que en la Figura 110 esta zona se muestra sin información.

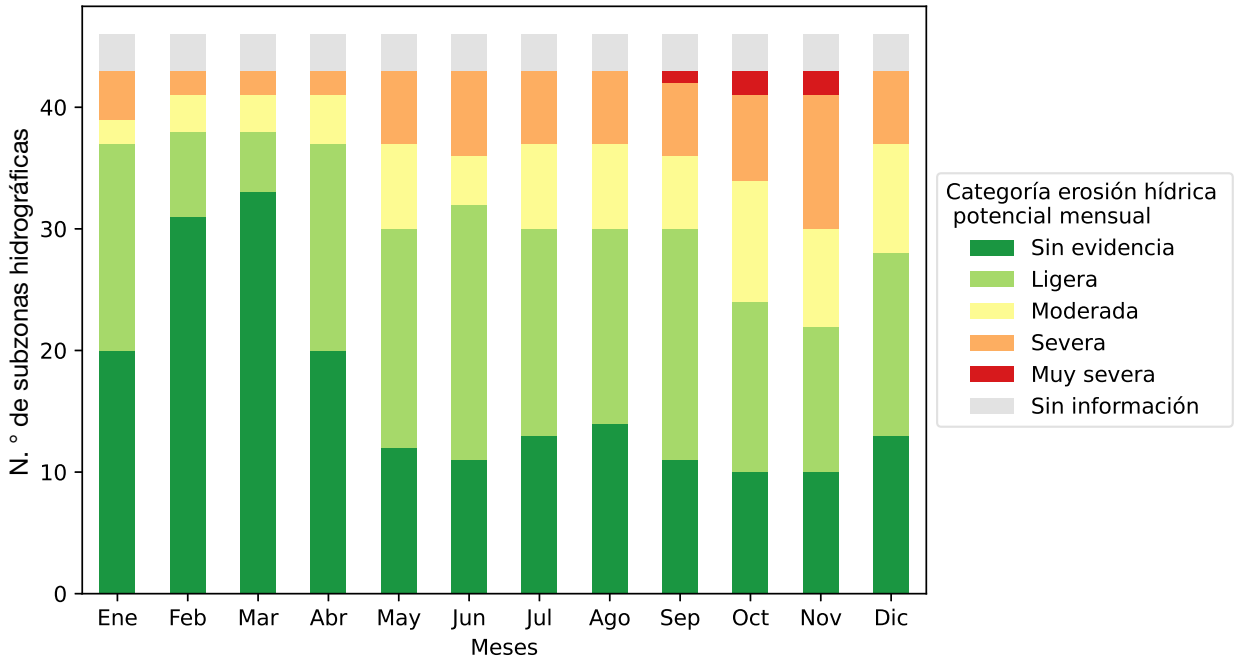



Figura 109. Área hidrográfica Caribe: variabilidad anual de la erosión hídrica potencial y número de subzonas en cada categoría para cada mes.

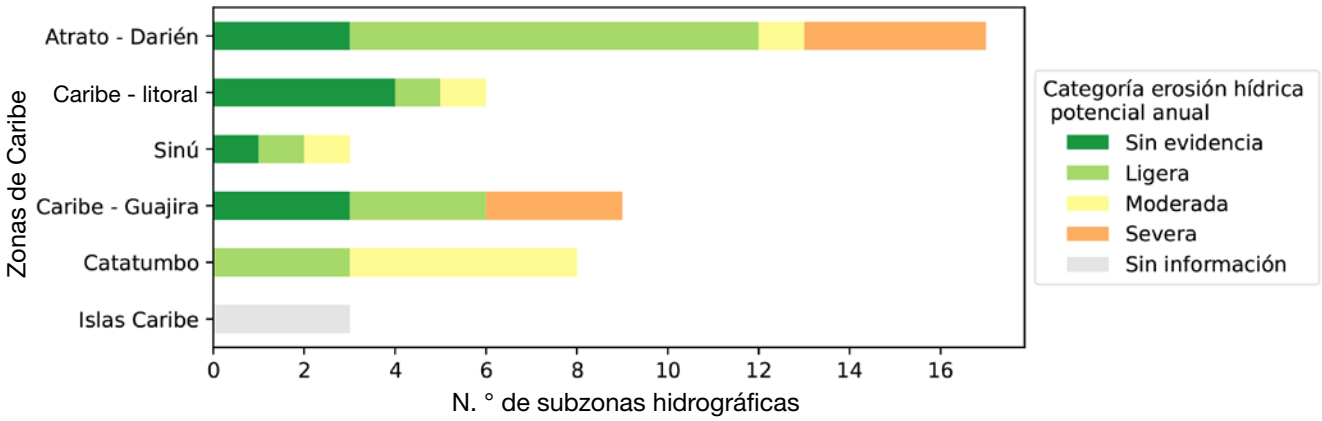



Figura 110. Número de subzonas en cada categoría de erosión hídrica potencial para el área hidrográfica Caribe.

Las subzonas identificadas con erosión severa se localizan en la vertiente norte de la Sierra Nevada de Santa Marta y en la zona noroccidental de la cordillera Occidental. Estas zonas coinciden con las evidencias presentadas en el Mapa de degradación de suelos por erosión (Ideam y UDCA, 2015) y en la zonificación de amenazas por movimiento en masa del SIMMA (2022).

En términos de relación de entrega en ladera, la zona Atrato-Darién presenta valores de relación de entrega en ladera predominante baja, mientras que en Caribe litoral, Catatumbo y Sinú predomina una relación de entrega en ladera alta. Para Caribe-Guajira se tiene una relación de entrega en ladera alta en zona cercana a las áreas con erosión severa en al menos un mes (río Piedra, río Manzanares). En la Figura 111, se muestra el número de subzonas en cada categoría de relación de entrega agrupadas por zona hidrográfica.

En la Tabla 40, se presentan tres estaciones donde se reportan valores altos de rendimiento; se localizan en Atrato-Darién y en Caribe litoral. Los resultados de rendimiento estimados por balance de largo plazo se muestran en la Figura 112, donde se identifican mayores áreas con rendimientos altos y muy altos en las zonas Atrato-Darién y Catatumbo.

En la zona Atrato-Darién, en las subzonas Río Sucio y Río Murrí, donde predominan coberturas de suelo con fines agrícolas, se identifica erosión hídrica potencial severa, resultados coherentes con la zonificación de amenazas por movimiento en masa donde se observa amenaza alta y muy alta y, adicionalmente, se han identificado eventos (SIMMA, 2022). Se tiene una relación de entrega en ladera media que, al realizar el balance de sedimentos, se traduce en rendimientos altos y muy altos, lo cual resulta coherente con los observado en estaciones.

En la zona Catatumbo, en las subzonas Río Pamplonita y Río Zulia, se identifica erosión hídrica potencial ligera y una conectividad alta, por lo que los resultados de rendimiento con balance de sedimentos presentan valores altos y muy altos en la parte alta de las cuencas. Este resultado es coherente con la zonificación de amenazas por movimiento en masa donde se identifica amenaza alta y muy alta y, además, se tiene una alta densidad de eventos estimados (SIMMA, 2022). Los valores de rendimiento en estaciones presentan valores bajos y muy bajos debido al área de las cuencas aferentes.

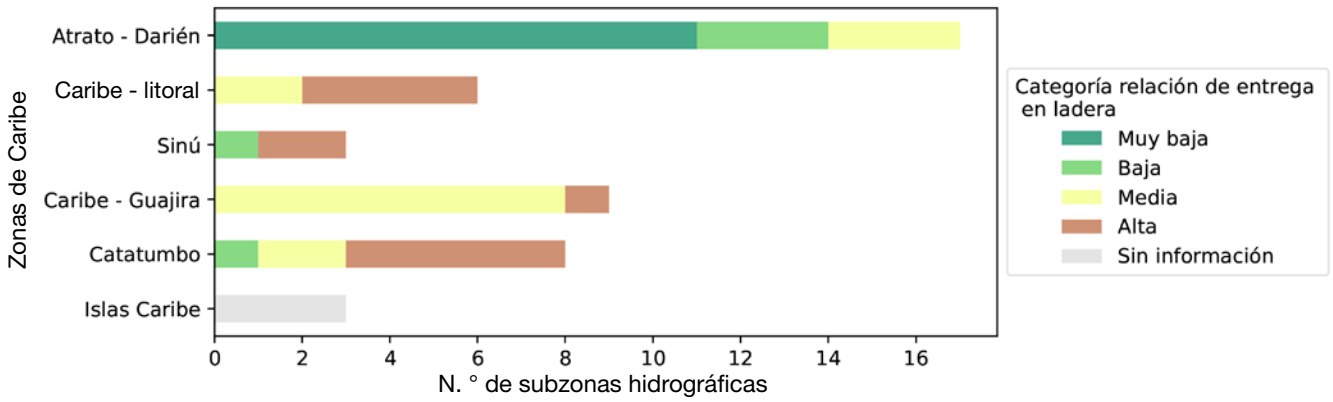



Figura 111. Número de subzonas en cada categoría de relación de entrega en ladera para el área hidrográfica Caribe.

Tabla 40. Valores altos y muy altos de rendimiento de sedimentos medido en estaciones en el área hidrográfica Caribe.

| Nombre estación | Código de estación | Corriente | Rendimiento (kt/año*km²) |
|---|---|---|---|
| Mutatá | 11117040 | Riosucio | 1,29 |
| Barranquillita | 12017020 | León | 1,18 |
| Pueblo Nuevo | 12027050 | Mulatos | 1,02 |

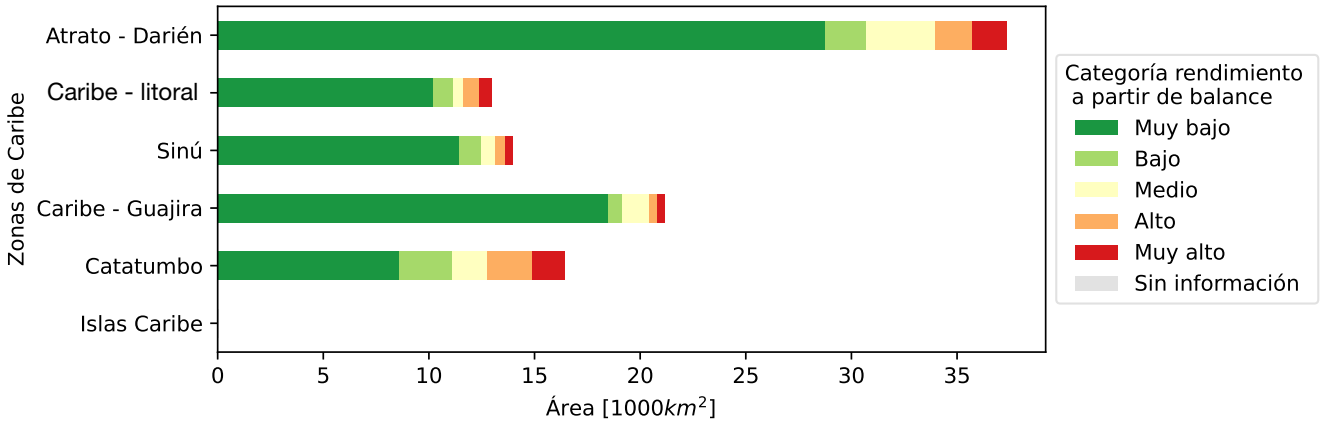



Figura 112. Distribución espacial por categorías de rendimiento estimado con balance, área hidrográfica Caribe.

## 5.3.2 Área hidrográfica Magdalena-Cauca

En el área hidrográfica Magdalena-Cauca, se presenta erosión hídrica potencial muy severa en las zonas Saldaña, Medio Magdalena, Cauca y Nechí. Los meses de febrero, marzo, agosto y septiembre presentan una menor erosión, mientras que mayo, junio, octubre y noviembre tienen una mayor erosión (Figura 113).

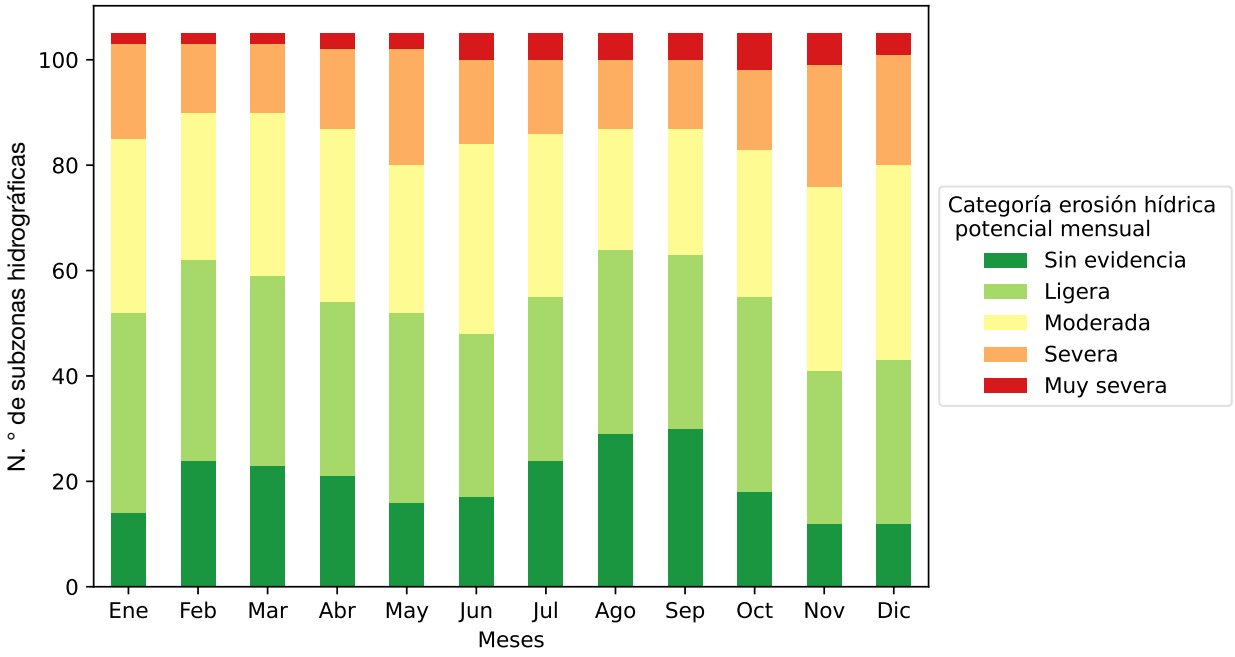



Figura 113. Variabilidad anual de la erosión hídrica potencial, número de subzonas en cada categoría para cada mes, área hidrográfica Magdalena-Cauca.

En las zonas del Alto Magdalena, Cesar y Bajo Magdalena predomina la erosión hídrica potencial ligera y sin evidencia, mientras que en las zonas de Sogamoso y Bajo Magdalena-Cauca y San Jorge se presenta erosión moderada y ligera (Figura 114).

Las subzonas identificadas con erosión muy severa o severa se localizan principalmente en la vertiente oriental de la cordillera Occidental, vertiente occidental de la cordillera Central y vertiente occidental de cordillera Oriental. Estas zonas coinciden con las evidencias presentadas en el Mapa de degradación de suelos por erosión (Ideam y UDCA, 2015) y en la zonificación de amenazas por movimiento en masa (SIMMA, 2022).

En términos de relación de entrega en ladera, el área Magdalena-Cauca en general presenta valores altos y muy altos, los cuales están relacionados con la zona montañosa predominante en el área. Solo la zona Cauca cuenta con una relación de entrega en ladera baja en una de sus subzonas y el Magdalena bajo una relación de entrega media en todas sus subzonas (Figura 115). Las áreas donde se presenta erosión hídrica potencial muy severa y severa coinciden con valores de conectividad altos y muy altos.

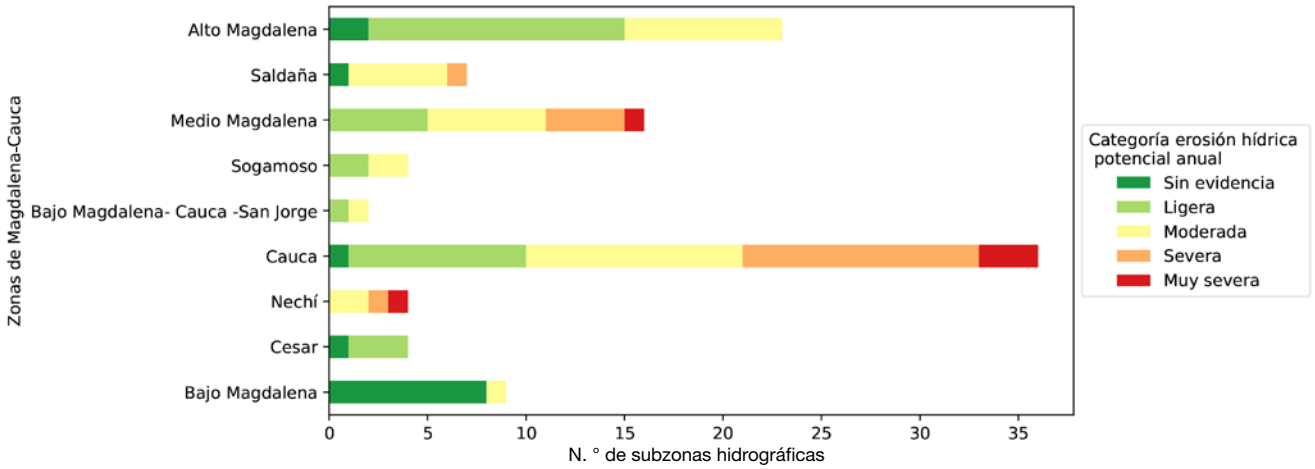



Figura 114. Número de subzonas en cada categoría de erosión hídrica potencial para el área hidrográfica Magdalena-Cauca.

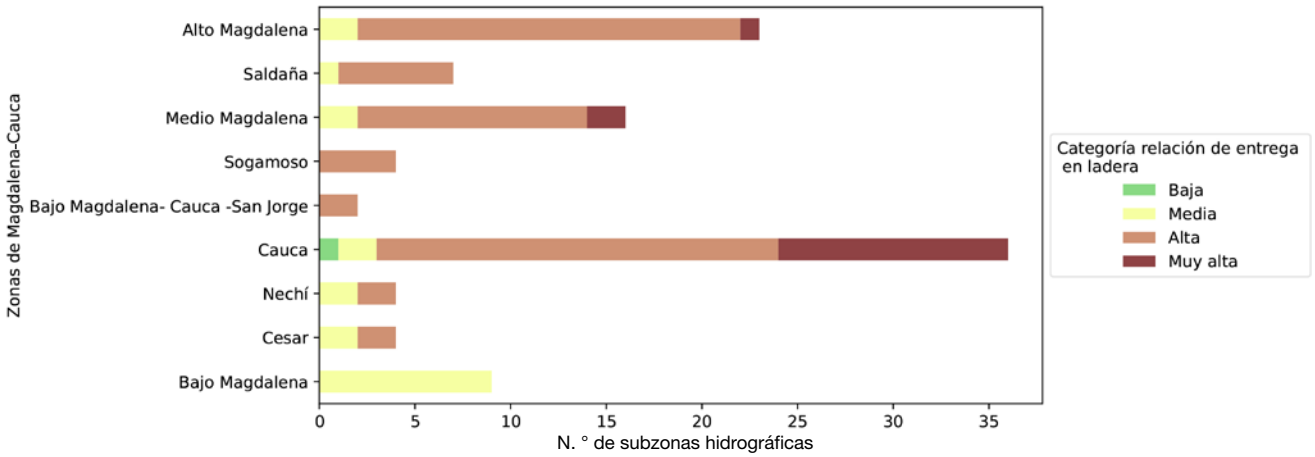



Figura 115. Número de subzonas en cada categoría de relación de entrega en ladera para el área hidrográfica Magdalena-Cauca.

En la Tabla 41, se presentan 20 estaciones donde se reportan valores de rendimiento muy altos y altos, que se localizan en Saldaña, Alto Magdalena, Medio Magdalena, Sogamoso y Cauca. Los resultados de rendimiento estimados por balance de largo plazo se muestran en la Figura 116, donde se identifican mayores áreas con rendimientos altos y muy altos en las zonas de Cauca, y Alto y Medio Magdalena.

Tabla 41. Valores altos y muy altos de rendimiento de sedimentos medido en estaciones en el área hidrográfica Magdalena-Cauca.

| Nombre estación | Código estación | Corriente | Rendimiento (kt/año*km²) |
|---|---|---|---|
| La Esmeralda | 21257090 | Lagunilla | 1,37 |
| El Cóndor | 22027010 | Atá | 1,97 |
| La Esperanza | 22037010 | Mendarco | 1,13 |
| Piedras de Cobre | 22057010 | Saldaña | 1,16 |
| Pte. Carretera | 23027060 | Guarinó | 2,08 |
| San Miguel (automática) | 23057140 | La Miel | 1,10 |
| Puerto Libre | 23067040 | Negro | 1,97 |
| Guaduero | 23067050 | Negro | 1,04 |
| Borbur | 23127010 | Minero | 2,98 |
| Puerto Araújo (automática) | 23127020 | Carare | 2,72 |
| Sta. Rosa | 23127060 | Carare | 2,36 |
| Pte. Ferrocarril | 23147020 | Opón | 1,10 |
| El Jordán | 24037360 | Chicamocha | 1,81 |
| Margento | 25027050 | Cauca | 1,10 |
| Alto del Rosario | 25027400 | Caño Las Palomas | 2,65 |
| La Galera | 26217010 | Tonusco | 1,98 |
| Puerto Valdivia (automática) | 26237040 | Cauca | 1,14 |
| La Coquera (automática) | 26247020 | Cauca | 1,42 |
| Apaví | 26247030 | Cauca | 1,74 |
| Las Camelias (automática) | 26247050 | Tarazá | 1,12 |

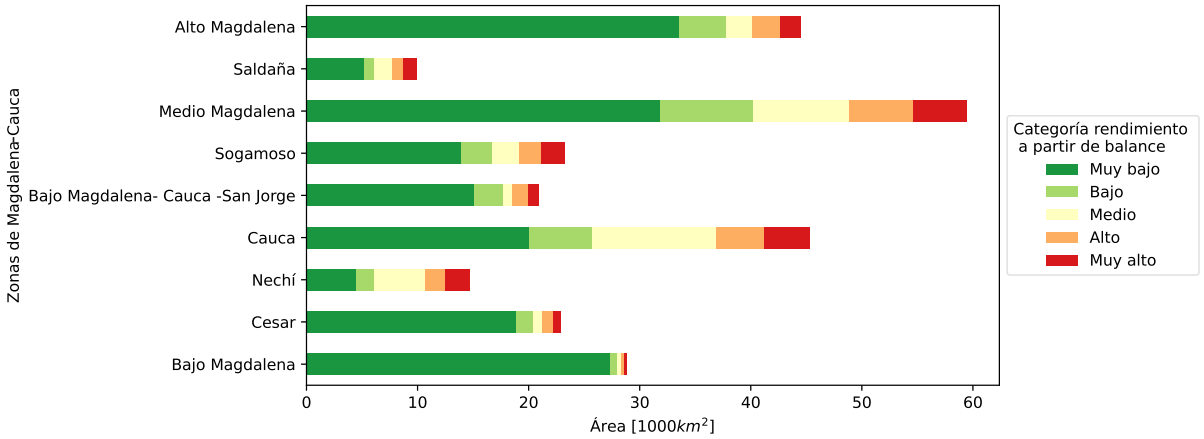



Figura 116. Distribución espacial por categorías de rendimiento estimado con balance, área hidrográfica Magdalena-Cauca.

Las zonas de Alto Magdalena, Medio Magdalena y Cauca tienen un alto porcentaje de coberturas de suelos con fines agrícolas que, sumado a las altas pendientes, se traduce en una alta producción de sedimentos por erosión hídrica potencial y además generan una alta relación de entrega en ladera; estos dos factores favorecen altos rendimientos, lo que se refleja en los valores de rendimiento estimados a partir de datos observados y a partir de balance de sedimentos. Estos resultados son coherentes con la zonificación de amenazas por movimiento en masa (SIMMA, 2022), donde en el Magdalena alto y medio se identifica ante todo amenaza alta, y en Cauca, amenaza alta y muy alta. También se tiene una alta densidad de eventos de movimiento en masa identificados en estas zonas (SIMMA, 2022). Se resalta la subzona Carare-Minero, donde se tienen rendimientos altos y muy altos en las cuatro estaciones localizadas en esta zona.

En las zonas Bajo Magdalena-Cauca-San Jorge y Bajo Magdalena se tiene una producción de sedimentos por erosión moderada, ligera y sin evidencia, y una relación de entrega predominantemente media. Sin embargo, en la zona de la Depresión Momposina, donde predominan coberturas de suelos de áreas húmedas, se tienen valores bajos de relación de entrega en ladera (mapa distribuido), por lo que se puede considerar que el material erosionado es depositado en ladera. También se resaltan los rendimientos bajos y muy bajos en esta zona, debido al cambio de pendiente y al área considerable que drena hasta este punto. La parte baja de estas zonas se considera sensible a procesos de depósito en cauce y en ladera.

### 5.3.3 Área hidrográfica Orinoco

En el área hidrográfica de la Orinoquía se presenta erosión hídrica potencial severa en las zonas de Meta y Arauca. Los meses de febrero y marzo muestran una menor erosión, mientras que junio y julio cuentan mayor erosión. La zona Meta tiene erosión muy severa en al menos un mes en seis subzonas; y la zona Arauca presenta erosión muy severa en al menos un mes en una de sus subzonas (Figura 117).

En las zonas de Inírida, Guaviare, Vichada, Tomo, Casanare, Orinoco directos y Apure predomina la erosión hídrica potencial sin evidencia; en el caso de Guaviare, algunas de sus subzonas presentan erosión moderada (Figura 118).

Las subzonas identificadas con erosión muy severa o severa se localizan principalmente en la zona de piedemonte. Estas coinciden con las evidencias presentadas en el Mapa de degradación de suelos por erosión (Ideam y UDCA, 2015) y la zonificación de amenazas por movimiento en masa (SIMMA, 2022).

En términos de relación de entrega en ladera, se tienen valores medios, altos y muy altos en la zona de piedemonte localizada en las zonas de Guaviare, Meta y Arauca (Figura 119). En la zona de piedemonte se presenta erosión hídrica potencial moderada y severa, y también se dan valores medios, altos y muy altos de relación de entrega en ladera.

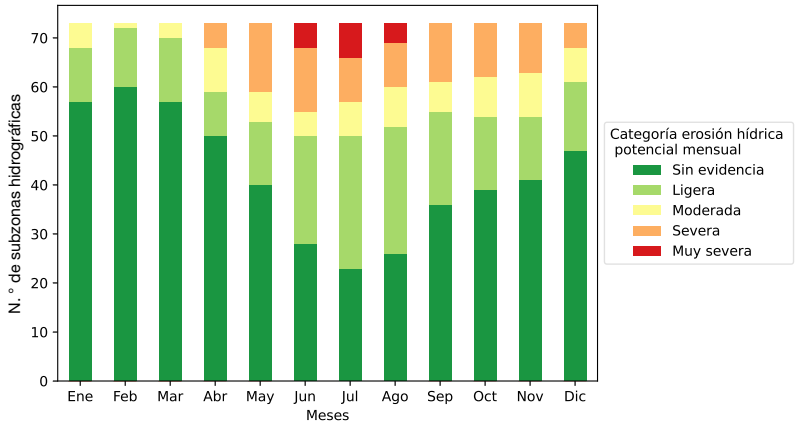



Figura 117. Variabilidad anual de la erosión hídrica potencial, número de subzonas en cada categoría para cada mes, área hidrográfica Orinoquía.

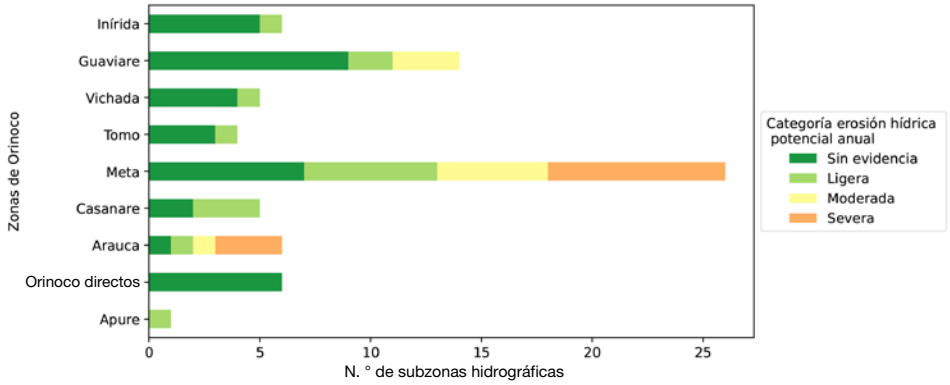



Figura 118. Número de subzonas en cada categoría de erosión hídrica potencial para el área hidrográfica Orinoquía.

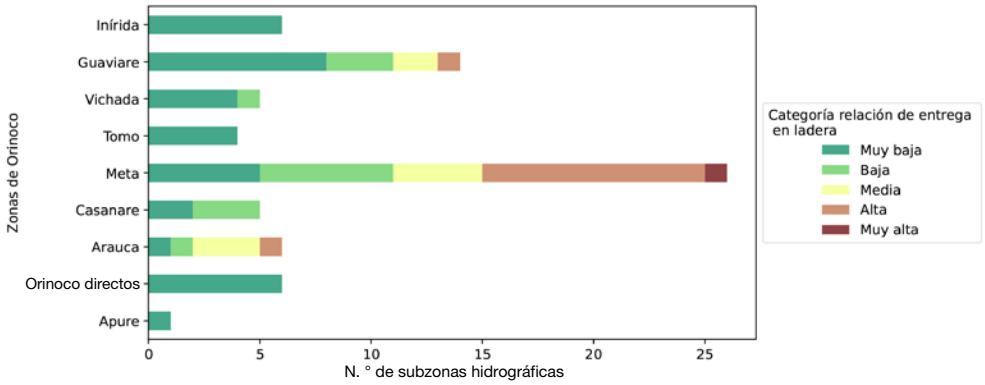



Figura 119. Número de subzonas en cada categoría de relación de entrega en ladera para el área hidrográfica Orinoquía.

En la Tabla 42, se muestran cuatro estaciones donde se reportan valores muy altos y altos de rendimiento que se localizan en la zona de piedemonte. Los resultados de rendimiento estimados por balance de largo plazo se muestran en la Figura 120, en donde se identifican mayores áreas con rendimientos altos y muy altos en las zonas de Guaviare y Meta.

En la parte de alta de las zonas Meta y Guaviare, donde está el piedemonte se tiene una alta producción de sedimentos por erosión hídrica potencial, así como una relación de entrega en ladera alta. En la zona de piedemonte localizada en el Meta se identifica cobertura de suelos predominantemente agrícola, mientras que en la zona de piedemonte en Guaviare se tiene mayor presencia de cobertura de suelos naturales. En el Meta se tienen rendimientos de sedimentos mayores que en el Guaviare, tanto en rendimiento estimado a partir de datos medidos como en rendimientos estimados a partir de balance de sedimentos. En esta zona de piedemonte se tiene una alta densidad de eventos de movimiento en masa (SIMMA, 2022).

En la parte oriental del área de la Orinoquía se cuenta con baja densidad de estaciones de monitoreo, al realizar el balance de sedimentos propuesto se encuentran valores de rendimiento bajos y muy bajos. Sin embargo, en la parte alta de las zonas Inírida y Vichada se estiman rendimientos medios. En cuanto a la zona Arauca en su parte central, donde predominan coberturas de suelos agrícolas, se estiman rendimientos altos, los cuales no se pueden corroborar dado que no se cuenta con estaciones en esta parte de la zona.

Tabla 42. Valores altos y muy altos de rendimiento de sedimentos medido en estaciones en el área hidrográfica Orinoquía.

| Nombre estación | Código de estación | Corriente | Rendimiento (kt/año*km²) |
|---|---|---|---|
| Mundo Nuevo | 35067130 | Rucio | 1,24 |
| El Camoyo | 35077050 | Quebrada Chivor | 4,14 |
| San Agustín | 35087010 | Lengupá | 2,75 |
| Páez | 35087020 | Lengupá | 1,98 |

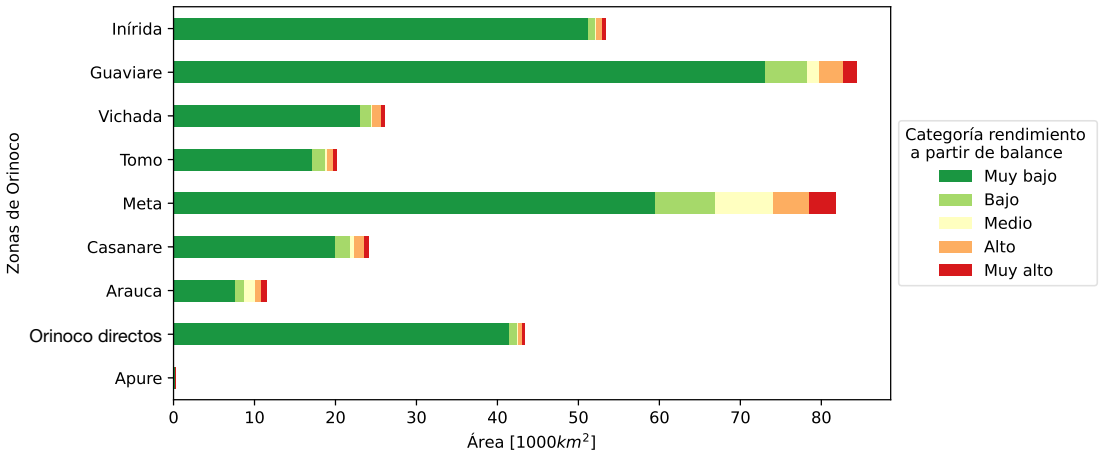



Figura 120. Distribución espacial por categorías de rendimiento estimado con balance, área hidrográfica Orinoquía.

### 5.3.4 Área hidrográfica Amazonas

En el área hidrográfica Amazonas se presenta erosión hídrica potencial moderada y severa, en al menos un mes, en las zonas de Caquetá, Caguán y Napo. Los meses de enero y febrero presentan una menor erosión, mientras que junio y julio, una mayor erosión (Figura 121).

En las zonas Guainía, Vaupés, Apaporis, Yarí, Putumayo y Amazonas directos predomina la erosión hídrica potencial sin evidencia; en el caso de Vaupés, Yarí y Putumayo, algunas de sus subzonas presentan erosión ligera (Figura 122).

Las subzonas identificadas con erosión severa y moderada se localizan principalmente en la franja de piedemonte. Estas zonas coinciden con las evidencias presentadas en el Mapa de degradación de suelos por erosión (Ideam y UDCA, 2015) y la zonificación de amenazas por movimiento en masa (SIMMA, 2022).

En términos de relación de entrega en ladera, se tienen valores medios y altos en la zona de piedemonte localizada en las zonas Vaupés, Caquetá y Caguán (Figura 123). Las zonas de Caquetá y Caguán cuentan con erosión hídrica potencial moderada y también valores altos de relación de entrega en ladera.

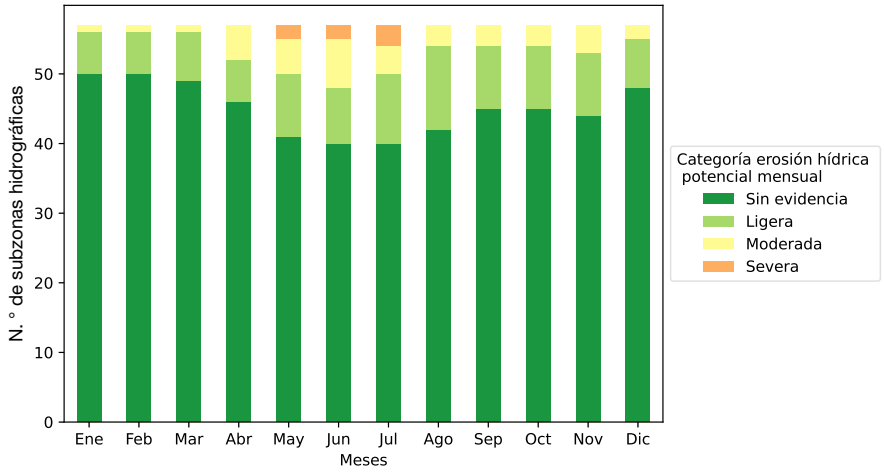



Figura 121. Variabilidad anual de la erosión hídrica potencial, número de subzonas en cada categoría para cada mes, área hidrográfica Amazonía.

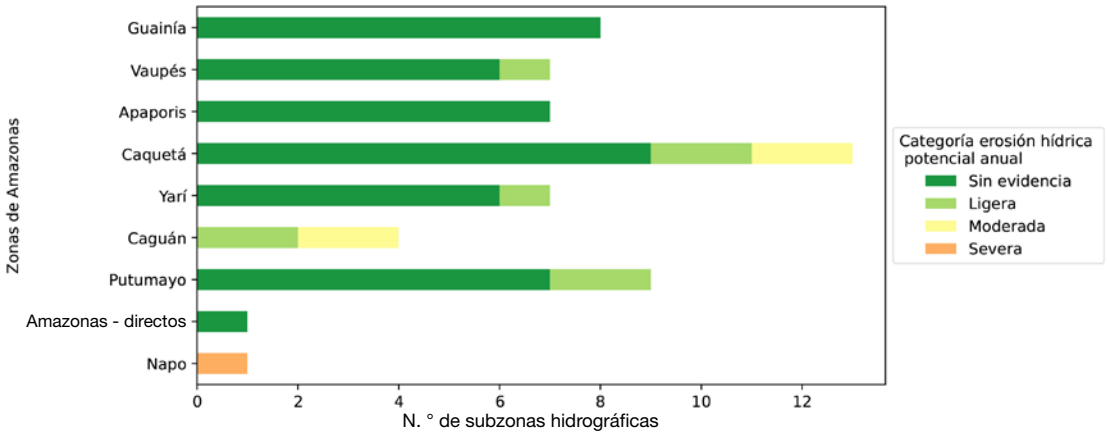



Figura 122. Número de subzonas en cada categoría de erosión hídrica potencial para el área hidrográfica Amazonía.

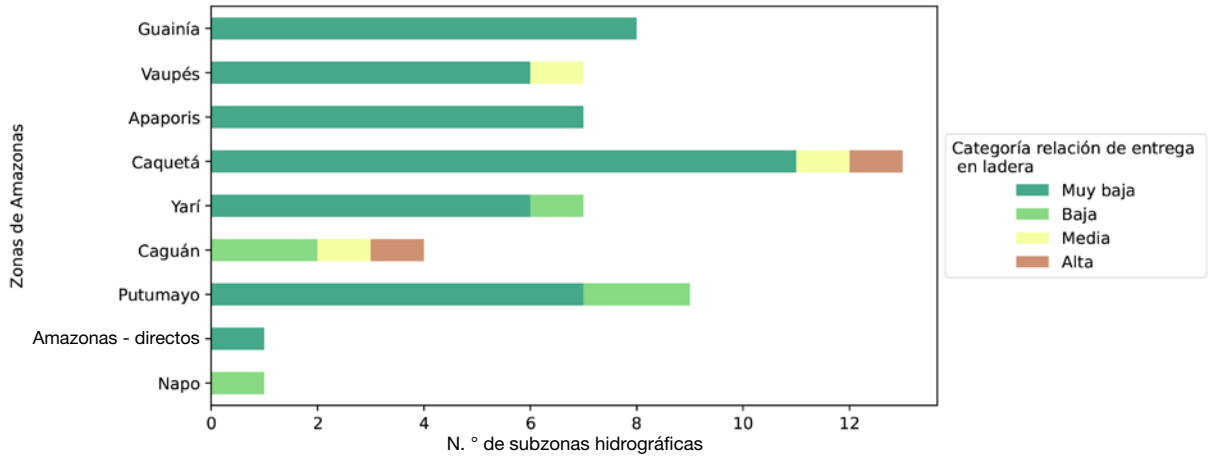



Figura 123. Número de subzonas en cada categoría de relación de entrega en ladera para el área hidrográfica Amazonía.

En esta zona se cuenta con diez estaciones hidrológicas (con información reciente) localizadas en la parte alta de Putumayo, Caquetá y Caguán; dos de estas tienen un rendimiento medio y se localizan en la zona de Caquetá. Los resultados de rendimiento estimados por balance de largo plazo se muestran en la Figura 124, donde se identifican mayores áreas con rendimientos altos y muy altos en las zonas de Caquetá y Caguán.

En la zona de piedemonte de Caquetá y Caguán predomina la cobertura de suelos agrícolas, se tiene una erosión hídrica potencial moderada, así como una relación de entrega en ladera alta. La suma de estos factores lleva a rendimientos medios estimados con datos medidos en estaciones, y altos y muy altos estimados con balance de sedimentos.

Los resultados de rendimientos estimados por balance de sedimentos presentan rendimientos medios en la parte alta de las zonas Vaupés, Apaporis y Yarí, en donde no se cuenta con estaciones para corroborar los resultados de estas estimaciones. En la zona sur de esta área se tienen valores bajos de producción y transporte de sedimentos.

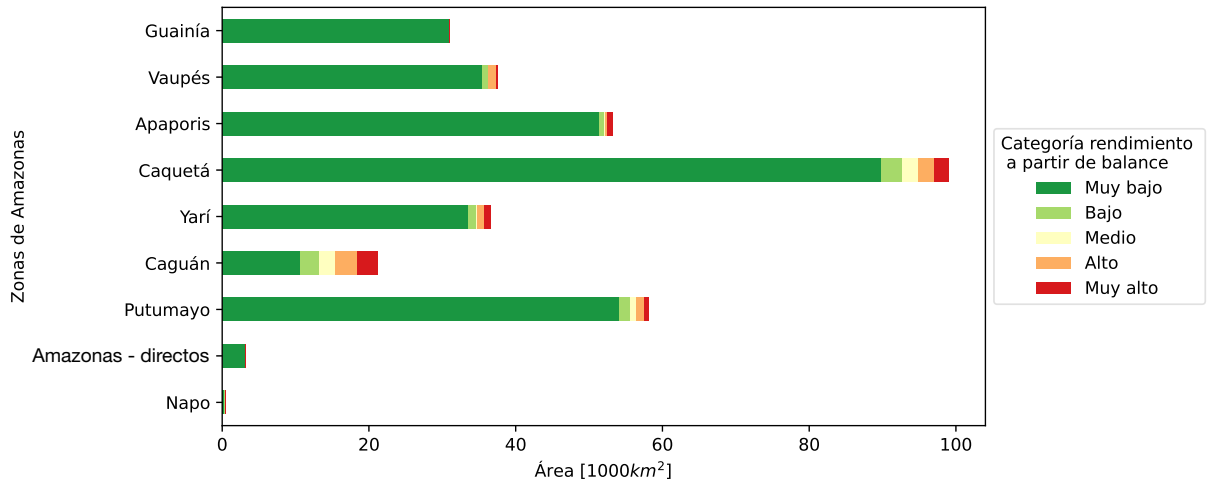



Figura 124. Distribución espacial por categorías de rendimiento estimado con balance, área hidrográfica Amazonía.

### 5.3.5 Área hidrográfica Pacífico

En el área hidrográfica Pacífico se presenta erosión hídrica potencial muy severa y severa, en al menos un mes, en las zonas de Mira, Patía, Tapaje-Dagua-directos y San Juan. Los meses de febrero, marzo, agosto y septiembre presentan una menor erosión, mientras que en abril, mayo, noviembre y diciembre, una mayor erosión (Figura 125).

En las zonas Baudó-directos Pacífico y Pacífico-directos predomina la erosión hídrica potencial ligera; estas zonas están conformadas por dos subzonas y una subzona hidrográfica, respectivamente (Figura 126).

Las subzonas identificadas con erosión muy severa y severa se localizan sobre todo en la vertiente occidental de la cordillera Occidental. Estas zonas coinciden con las evidencias presentadas en el Mapa de degradación de suelos por erosión (Ideam y UDCA, 2015) y la zonificación de amenazas por movimiento en masa (SIMMA, 2022).

En términos de relación de entrega en ladera, se tienen valores altos y muy altos en la zona alta del Patía y valores medios en algunas subzonas de Mira, Tapaje-Dagua-directos y San Juan (Figura 127). Las zonas Baudó-directos Pacífico y Pacífico directos tiene relación de entrega muy baja en sus subzonas.

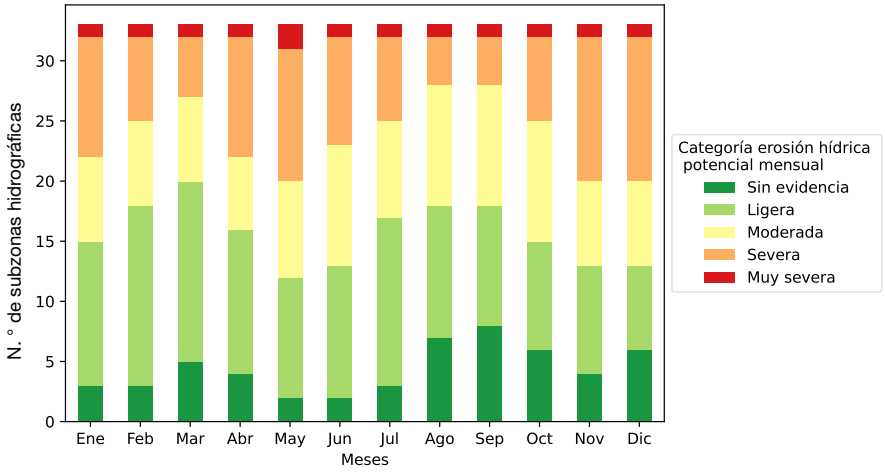



Figura 125. Variabilidad anual de la erosión hídrica potencial, número de subzonas en cada categoría para cada mes, área hidrográfica Pacífico.

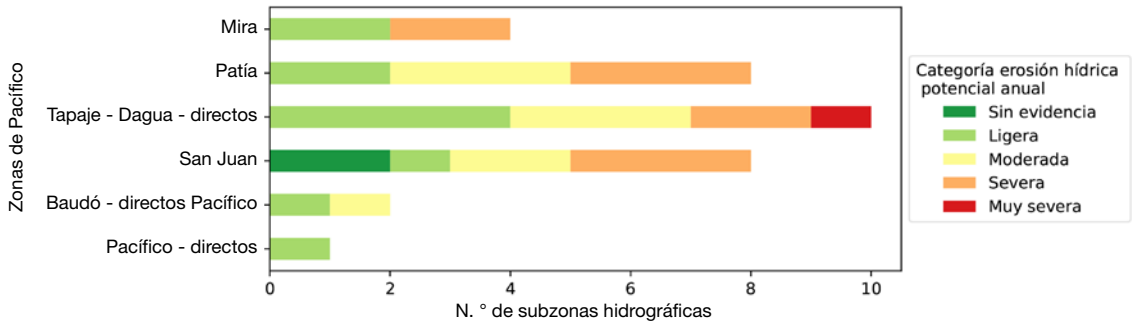



Figura 126. Número de subzonas en cada categoría de erosión hídrica potencial para el área hidrográfica Pacífico.

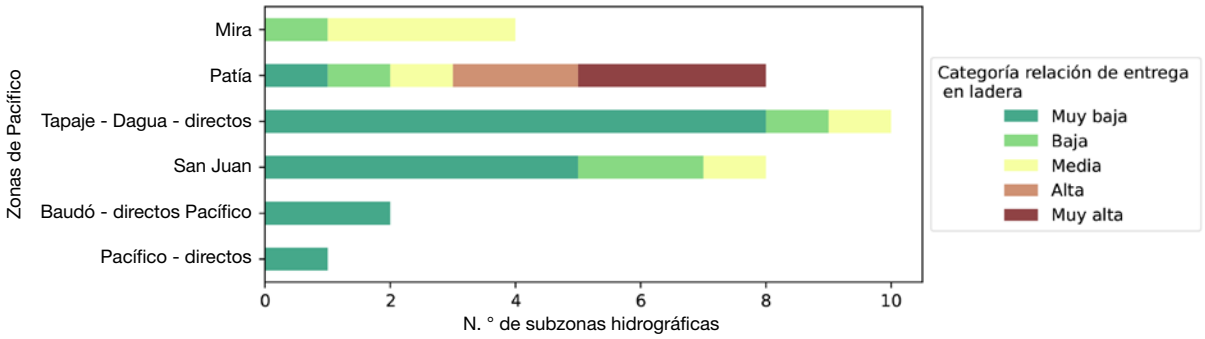



Figura 127. Número de subzonas en cada categoría de relación de entrega en ladera para el área hidrográfica Pacífico.

En la Tabla 43, se presentan dos estaciones en las que se reportan valores altos de rendimiento, localizadas en las zonas Patía y San Juan. Los resultados de rendimiento estimados por balance de largo plazo se muestran en la Figura 128, en donde se identifican mayores áreas con rendimientos altos y muy altos en las zonas Patía, Tapaje-Dagua-directos y San Juan.

En la parte alta de las zonas de Patía, Tapaje-Dagua-directos y San Juan predomina la cobertura de suelos con fines agrícolas; también es una zona que se caracteriza por una alta magnitud de precipitación. En estas zonas se tienen erosión hídrica potencial severa y muy severa, así como una relación media de entrega en ladera. Estas dos características proporcionan valores altos y muy altos de rendimiento, lo que se refleja en los rendimientos estimados con balance de sedimentos y los rendimientos estimados con datos medidos en estaciones.

Tabla 43. Valores altos y muy altos de rendimiento de sedimentos medido en estaciones en el área hidrográfica Pacífico.

| Nombre estación | Código de estación | Corriente | Rendimiento (kt/año*km²) |
|---|---|---|---|
| Puente Pusmeo (automática) | 52077010 | Patía | 1,96 |
| Tadó (automática) | 54017040 | San Juan | 1,08 |

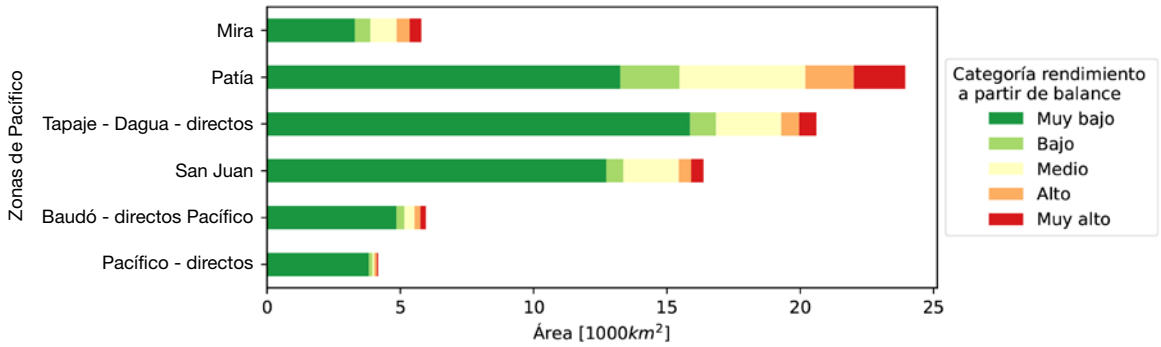



Figura 128. Distribución espacial por categorías de rendimiento estimado con balance, área hidrográfica Pacífico.

## 5.4 Consideraciones y recomendaciones sobre la dinámica de los sedimentos

- La erosión hídrica potencial es severa y muy severa ante todo en las subzonas localizadas en las vertientes de la Sierra Nevada de Santa Marta y en las vertientes de los ramales de la cordillera de los Andes. Esto debido a las condiciones de alta pendiente y a una cobertura del suelo que, de forma predominante, tiene fines agrícolas.

- Los departamentos en donde se identifica una mayor área con erosión hídrica potencial severa y muy severa son Antioquia, Santander, Boyacá, Cundinamarca, Caldas, Risaralda, Chocó, Tolima, Cauca y Nariño. Asimismo, en las zonas de piedemonte en los departamentos de Caquetá, Meta y Casanare se presenta erosión hídrica potencial entre moderada y severa, al igual que en las vertientes de la Sierra Nevada de Santa Marta, en los departamentos de La Guajira y Magdalena.

- El modelo de erosión hídrica potencial empleado no representa conceptualmente movimiento en masa; sin embargo, evidencia resultados coherentes con la zonificación de amenazas por movimiento en masa y con el inventario de movimientos en masa.

- La relación de entrega en ladera es mayor en las subzonas localizadas en las vertientes de los ramales de la cordillera de los Andes y en la serranía del Perijá. Siendo así, el material erosionado en ellas tiene una alta probabilidad de transportarse al cauce o depósito más cercano, por lo que se afectarían las condiciones del recurso hídrico.

- La información disponible con al menos un año completo es menor con respecto al ENA 2018, donde se revisó información de concentraciones para 64 estaciones, mientras que para 2022 solo se cuenta con información en cinco estaciones. En el caso de transporte, en el ENA 2018 se analizaron 326 estaciones, mientras que para 2022 solo se cuenta con información completa para al menos un año adicional en 206 estaciones. Es importante continuar con un monitoreo constante para identificar cambios en el régimen de los sedimentos en el territorio nacional.

- Las zonas en las que se cuenta con valores mayores de erosión hídrica potencial, relación de entrega en ladera y rendimiento de sedimentos estimado en estaciones y con balance de sedimentos corresponden a áreas donde se tienen valores altos de escorrentía, suelos con alta erodabilidad, altas pendientes y amplias áreas en coberturas de cultivos y pastos sin prácticas de conservación del suelo.

- Las zonas de depósito potencial se caracterizan por valores bajos de relación de entrega en ladera y rendimiento de sedimentos estimado en estaciones y con balance de sedimentos. La característica principal de estas zonas son las bajas pendientes.

- Realizar cambios de cobertura e implementar prácticas de control y conservación de los suelos son medidas que pueden reducir de cierto modo la producción de sedimentos. Sin embargo, factores como la pendiente y la escorrentía son intrínsecas a las zonas, y si estas favorecen los procesos erosivos, estos seguirán ocurriendo.

- Gracias a la resolución espacial y temporal de los análisis y a los productos presentados en este capítulo es posible usarlos en escalas de mayor detalle y en estudios específicos de cuencas hidrográficas. De esta forma, pueden ser de utilidad en planes de ordenamiento territorial, en planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas, y en estudios de cuencas y microcuencas abastecedoras de acueductos, entre otros usos.



**Foto por:**
Diana Carolina Muñoz
Garza morena

# HIDROLOGÍA ISOTÓPICA EN COLOMBIA

**Autores:**

**IDEAM:**
Luis Eduardo Toro Espitia

CAPÍTULO 6

# 6. Hidrología isotópica en Colombia

La *hidrología isotópica* es la rama de la ciencia que utiliza herramientas isotópicas y técnicas nucleares para el estudio del ciclo del agua (Aggarwal et al., 2005). Sus orígenes se remontan a finales de la década de los 40 y comienzos de los años 50 del siglo XX, cuando muchos científicos involucrados en el desarrollo de la ciencia nuclear regresaron a la vida civil una vez finalizada la Segunda Guerra Mundial. Los isótopos estables y radiactivos pueden ser utilizados como trazadores naturales para comprender el origen y la evolución del agua a través de todos los compartimentos del ciclo hidrológico. En tal sentido, son un complemento ideal para otras ramas de la ciencia como la hidroquímica.

La hidrología isotópica implica determinar la composición isotópica de la lluvia, y de ríos, lagos, humedales, manantiales y pozos para luego interpretar sus diferencias en términos de tiempos de residencia del agua, interacciones entre aguas superficiales y subterráneas, condiciones climáticas y reacciones biológicas y químicas. Las técnicas isotópicas ayudan a identificar los procesos que gobiernan la calidad del agua, y proveen información para administrar y proteger los recursos hídricos.

En Colombia, los primeros estudios de hidrología isotópica datan de mediados de la década de 1970. La aplicación de herramientas isotópicas para resolver preguntas como ¿dónde se recargan los acuíferos? ha contado con la ayuda de programas de cooperación técnica internacional, en donde se destacan los buenos oficios del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

La mayoría de los estudios hidrológicos isotópicos llevados a cabo en nuestro país en los años 80 y 90 del siglo pasado estuvo concentrada en pocos entes, sobresaliendo los extintos Instituto de Asuntos Nucleares (IAN), Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas (INEA) e Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras o Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química (Ingeominas), predecesores del hoy Servicio Geológico Colombiano (SGC). Desde inicios del presente siglo, una mayor variedad de entidades colombianas ha incorporado en su agenda de trabajo las técnicas nucleares aplicadas a hidrología, entre ellas, algunas corporaciones autónomas regionales y la academia.

En los últimos ocho años han ocurrido tres hechos que están motivando el uso de las técnicas isotópicas en Colombia: (1) la implementación de la Red Nacional de Isotopía (RNI), operada por el Ideam con el concurso de otras instituciones colombianas; (2) la incorporación de las técnicas isotópicas en los estudios de impacto ambiental en el marco de solicitudes de licenciamiento ambiental para proyectos mineros, promulgada por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (Anla), y (3) el fortalecimiento del Laboratorio de Análisis de Isótopos Estables en Agua Líquida (LAIE) del SGC.

Por primera vez, el Estudio Nacional del Agua (ENA) incorpora un capítulo dedicado a la hidrología isotópica. Este capítulo tiene dos propósitos: por un lado, dar a conocer los primeros resultados de la Red Nacional de Isotopía, a través de la cual se construye una base de datos isotópicos de la precipitación en Colombia para el servicio de la comunidad científica. De otro lado, ilustrar algunas de las aplicaciones de las técnicas isotópicas para la solución de problemas hidrológicos a través de estudios de caso ejecutados por entidades y científicos colombianos.

La primera parte de este capítulo contiene algunas definiciones simples de conceptos que serán mencionados en el resto del capítulo. En la segunda parte se hace una revisión no exhaustiva de la historia de la hidrología isotópica en Colombia. La tercera parte está dedicada a la Red Nacional de Isotopía. Allí se presentan algunos productos preliminares de la red. En la cuarta parte, se dan a conocer cinco estudios de caso en donde se emplearon herramientas isotópicas para resolver preguntas hidrológicas concretas.

## 6.1 Definiciones básicas

A continuación, se presentan en orden alfabético definiciones simples de algunos conceptos fundamentales en hidrología isotópica que serán mencionados en este capítulo. En algunas ocasiones, las

definiciones vienen acompañadas de referencias bibliográficas para los interesados en profundizar en los temas de interés. Algunos de los mejores textos académicos que abordan la hidrología isotópica son: Clark y Fritz (1997); Kendall y McDonnell (1998); Cook y Herczeg (1999); Gat (2005); Aggarwal, Gat y Froehlich (2005); Appelo y Postma (2010); IAEA (2013) y Clark (2015).

**Evaporación secundaria.** En este capítulo, se denomina *evaporación secundaria* a la evaporación que afecta las gotas de lluvia en su descenso desde la base de la nube hasta el suelo. La evaporación secundaria modifica la composición isotópica de la gota de lluvia, enriqueciéndola. Este es un fenómeno natural y debe ser tenido en cuenta en la caracterización isotópica de la lluvia, y no debe ser confundido con la evaporación que sufren las muestras compuestas de lluvia durante su recolección y que es resultado de un protocolo indebido de muestreo.

**Exceso de deuterio.** Dansgaard (1964) acuñó el término *exceso de deuterio* para referirse al término independiente de una recta meteórica con pendiente de ocho.

Es decir, el exceso de deuterio es:
$d = \delta\ ^{2}H - 8 \cdot \delta\ ^{18}O$.

Este término se emplea para cada muestra de lluvia y se considera como un indicador de fraccionamiento isotópico cinético. Su unidad de medida es por miles (‰) respecto al patrón VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water).

**Fraccionamiento isotópico.** Es el cambio en la abundancia relativa de un isótopo entre la fuente y el producto en una reacción química o física, debido a diferencias en las propiedades de los isótopos o isotopólogos.

**GNIP.** En 1961, el OIEA en cooperación con la Organización Meteorológica Mundial (OMM) inició la Red Mundial de Isótopos en la Precipitación (GNIP por sus siglas en inglés), con una frecuencia de muestreo mensual. Durante la fase inicial, el seguimiento del tritio fue la actividad principal. El programa también fue lanzado con el objetivo de recolectar de manera sistemática datos del deuterio y del oxígeno-18 de la precipitación a escala mundial. Por tanto, la red GNIP suministra la base de datos para su uso en todo tipo de investigaciones hidrológicas. Muy pronto se hizo evidente que esta base de datos también era muy útil en otros campos de la ciencia relacionados con el agua como la oceanografía, la hidrometeorología y la climatología (Schotterer et al., 1996).

**Isótopo.** Los átomos que tienen el mismo número de protones, pero diferente número de neutrones, se llaman *isótopos.* Ellos comparten casi las mismas propiedades químicas, pero, al diferir en masa, presentan diferentes propiedades físicas. Por ejemplo, el hidrógeno está compuesto por tres isótopos, dos son estables (el $^{1}H$ y el $^{2}H$, este conocido como *deuterio*); y el tercero es inestable (el $^{3}H$, conocido como *tritio*).

**Isótopos estables.** Son átomos que no emiten radiación de manera espontánea. Su variación en la naturaleza está gobernada por el fraccionamiento isotópico.

**Isótopos radiactivos.** Son átomos cuyos núcleos son inestables, y disipan el exceso de energía emitiendo de manera espontánea radiación en forma de rayos alfa, beta o gamma. En hidrología, se usan principalmente para estimar el tiempo medio de residencia del agua subterránea.

**Isotopólogos.** Son moléculas que difieren en su contenido isotópico. Por ejemplo, la molécula liviana del agua está conformada por dos átomos $^{1}H$ y un átomo $^{16}O$. Esta representa más del 99,7 % de todas las moléculas de agua en la naturaleza. De vez en cuando, las moléculas de agua incorporan en su estructura un deuterio ($^{1}H_{2}H^{16}O$) o un oxígeno-18 ($^{1}H_{2}{}^{18}O$). Esos dos isotopólogos son moléculas pesadas de agua, y su abundancia en la naturaleza es del 0,03 % y el 0,2 %, respectivamente.

**Recta meteórica.** Es la relación lineal, a largo plazo, entre el oxígeno-18 y el deuterio en la lluvia.

Su ecuación tiene la forma $\delta\ ^{2}H = m \cdot \delta\ ^{18}O + d$, en la que $\delta\ ^{2}H$ es el deuterio, $\delta\ ^{18}O$ es el oxígeno-18, m es la pendiente de la recta y d es el término independiente.

Si la ecuación se estima con datos obtenidos en un único punto de observación, se habla de recta meteórica local. Si la recta se estima con datos de varias estaciones de una red local o regional, se habla de recta meteórica regional. Craig (1961) estableció la famosa recta meteórica mundial, la cual se define como:

$$\delta\,^{2}H = 8 \cdot \delta\,^{18}O + 10.$$

**Trazadores ambientales.** En hidrología isotópica se refiere a los isótopos que ya están incorporados en el ciclo hidrológico debido a procesos naturales.

**Trazadores artificiales.** Son sustancias preparadas por el hombre (por ejemplo, isótopos radiactivos concentrados) que se inyectan en forma premeditada y controlada al sistema hidrológico que se desea evaluar. La evolución de estos trazadores, a medida que viajan con el agua, da información sobre la dinámica de los recursos hídricos.

**Unidad de medida para el deuterio y el oxígeno-18.** Las concentraciones de los dos isótopos se expresan en notación delta (d) en por miles (‰) respecto al estándar mundial VSMOW. El patrón VSMOW representa la concentración isotópica promedio de todos los mares y, por definición, tiene una concentración de 0‰ tanto para el deuterio como para el oxígeno-18. Las concentraciones de deuterio y oxígeno-18 en cualquier muestra son relativas al patrón VSMOW. Valores positivos significan que la muestra está isotópicamente más enriquecida que el patrón universal. Valores negativos indican lo contrario. Más del 90 % de los contenidos de muestras naturales están empobrecidas respecto al patrón VSMOW.

## 6.2 Breve historia de la hidrología isotópica en Colombia

En Colombia, los primeros intentos de aplicar herramientas isotópicas para resolver problemas hidrológicos tal vez fueron los realizados en la década de los 70 del siglo pasado por el extinto Instituto de Asuntos Nucleares (IAN) con el apoyo del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Los trazadores artificiales fueron muy populares al comienzo de la hidrología isotópica. Por ejemplo, Múnera (1974) publica los resultados de ensayos de dilución de trazadores al interior de tres pozos; estas pruebas tuvieron como objetivo estimar las propiedades hidráulicas de los acuíferos captados por dichos pozos. En las décadas siguientes, los isótopos ambientales recibieron mayor atención y hoy día son los más estudiados en los proyectos de hidrología isotópica.

En la década de los 90, la mayoría de los proyectos de hidrología isotópica fueron ejecutados por el INEA (sucesor del IAN) y por Ingeominas (predecesor del Servicio Geológico Colombiano, SGC). A finales de dicha década y a comienzos del siglo actual, el espectro de entidades interesadas en la hidrología isotópica se amplió. Muchos proyectos de cooperación técnica auspiciados por el OIEA fueron dirigidos a autoridades ambientales (Coralina, CVC, Carder, Corpoguajira, Carsucre y Corpourabá), con el apoyo de Ingeominas y de universidades como la Universidad de Antioquia (UdeA).

Otros proyectos de hidrología isotópica han sido implementados de manera independiente por universidades, entidades territoriales, institutos de investigación y autoridades ambientales. Algunos de estos proyectos están relacionados con la instalación y operación de redes regionales de isótopos en la precipitación (por ejemplo, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Aguas y Aguas de Pereira -A&A-, CRQ, Corpochivor, Corpocaldas y el SGC). Otros proyectos buscan resolver preguntas hidrológicas concretas, como identificar las zonas de recarga de acuíferos (por ejemplo, la Universidad Nacional, la Universidad de Antioquia, la Universidad Industrial de Santander y el SGC) o evaluar procesos de contaminación (CRQ). En 2022, el OIEA continúa transfiriendo conocimientos por medio de su programa de cooperación técnica. La CRQ y Corpocaldas ejecutan el proyecto vigente (COL7005), con el apoyo de la Universidad de Antioquia y del SGC.

La Tabla 44 y la Figura 129 presentan un inventario no exhaustivo de proyectos de hidrología isotópica ejecutados en Colombia. En el listado no se incluyen proyectos en geotermia ni proyectos dirigidos a evaluar amenazas por volcanismo. Las etiquetas en el mapa coinciden con los números de la primera columna. En la penúltima colum-

na se indica el énfasis en el estudio, aunque en general los estudios de hidrología isotópica deben considerar varios compartimentos del ciclo hidrológico. La Figura 129 también muestra la ubicación de las estaciones activas de la red RNI, así como estaciones activas de la Red Mundial de Isótopos en la Precipitación (GNIP) localizadas en Colombia.

Tabla 44. Proyectos de hidrología isotópica (búsqueda no exhaustiva).

| ID | Fecha ejecución | Zona geográfica | Ejecutor principal | Objetivo proyecto | Apoyo |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1983-1986 | Atlántico - Bolívar | IAN, Ingeominas | Sub | OIEA |
| 2 | 1985-1986 | Sabana de Bogotá | IAN, Ingeominas, CAR | Sub | OIEA |
| 3 | 1986 | Chivor I y Chivor II | IAN, ISA | Emb | OIEA |
| 4 | 1989-1990 | Cuenca río Magdalena | IAN | Sup | OIEA |
| 5 | 1990-1993 | Tunja (Boyacá) | INEA, UPTC | Sub | OIEA |
| 6 | 1997-2002 | Sabana de Bogotá | Ingeominas, CAR | Sub | OIEA |
| 7 | 1997-2002 | Isla de San Andrés | Coralina | Sub | OIEA |
| 8 | 2001-2004 | Valle del Cauca | CVC, Ingeominas | Sub | OIEA |
| 9 | 2001-2004 | Morroa (Sucre) | Carsucre, Ingeominas | Sub | OIEA |
| 10 | 2001-2004 | Maicao (La Guajira) | Corpoguajira, Ingeominas | Sub | OIEA |
| 11 | 2001-2004 | Pereira (Risaralda) | Carder, Ingeominas | Sub | OIEA |
| 12 | 2005-2006 | Santa Fe de Antioquia | UNAL | Sub | |
| 13 | 2005-2006 | Bajo Cauca antioqueño | UdeA | Pre, Sub | |
| 14 | 2010-2015 | Túnel La Línea (Tolima y Quindío) | UNAL | Tun, Int | |
| 15 | 2014-2015 | Golfo de Morrosquillo | Carsucre | Sub | OIEA |
| 16 | 2014-2015 | Golfo de Urabá | Corpourabá | Sub | OIEA |
| 17 | 2014-2016 | Boyacá Centro Norte | SGC | Pre | |
| 18 | 2017-2018 | Río de Oro (Santander) | UIS | Sub | IRD (Francia) |
| 19 | 2017 | Lago Tota (Boyacá) | UPTC | Sub | |
| 20 | 2017 | Abanico Ibagué (Tolima) | UPTC | Sub | |
| 21 | 2017 | La Dorada (Caldas) | Corpocaldas | Sub | |
| 22 | 2011-2018 | Valle de Aburrá | UdeA | Pre, Sub | |
| 23 | 2016-2018 | Urabá (Antioquia) | UdeA | Sub | U. Montpellier |
| 24 | 2019 | Abanico del Quindío | CRQ | Sub, Pre | |
| 25 | 2019 | Río Otún | A&A, SHI | Bal | |
| 26 | 2020 | Abanico del Quindío | CRQ | Con | |

**Nota.** Sub=acuíferos. Sup=agua superficial. Pre=precipitación. Emb=fugas de embalses. Tun= túneles. Int=conexión agua superficial-agua subterránea. Con=contaminación. Bal=balance hídrico.

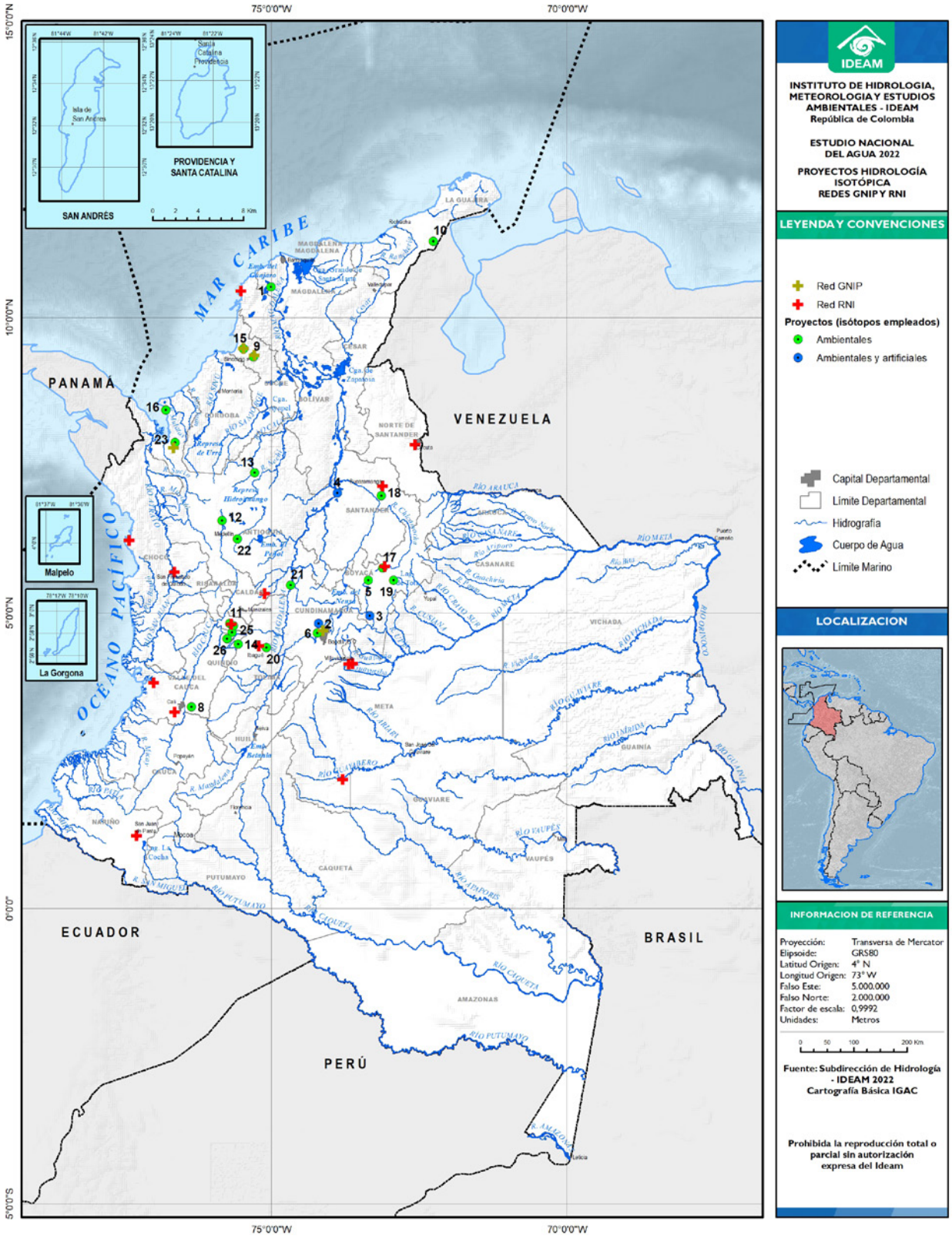



Figura 129. Localización proyectos de hidrología isotópica y estaciones de las redes RNI y GNIP.

## 6.3 El contenido isotópico de la lluvia en Colombia

Las variaciones temporales y espaciales de la concentración isotópica de la lluvia son causadas por el fraccionamiento isotópico durante los cambios de fases como evaporación, condensación y sublimación, y por mezclas de humedades con diferente origen. En un sitio particular, la firma isotópica de la lluvia dependerá de fenómenos atmosféricos sinópticos, a mesoescala o locales. Las trayectorias seguidas por las masas de aire que darán lugar a la precipitación, junto con su historial de evaporación/condensación hasta el punto de observación, son de importancia capital en la conformación del contenido isotópico de la lluvia.

Al estar sometidas a los mismos procesos de fraccionamiento isotópico, las variaciones de deuterio y oxígeno-18 en la lluvia muestran una estrecha correlación lineal. Uno de los primeros científicos en reconocer que esas variaciones podrían ser predichas fue Harmon Craig (1926-2003). Craig (1961) estableció la ecuación de la recta meteórica mundial (GMWL, por sus siglas en inglés) a partir de 400 muestras recolectadas en ríos, lagos y lluvia en distintos continentes. La GMWL se define como:

$$\delta\,^{2}H = 8 \cdot \delta\,^{18}O + 10 \qquad (1)$$

donde $\delta\,^{2}H$ es el deuterio y $\delta\,^{18}O$ es el oxígeno-18, ambos expresados en por miles con respecto al patrón primario VSMOW.

Posteriormente, y utilizando bases de datos conformadas por miles de registros, investigadores como Rozanski et al. (1993) y Bowen y Revenaugh (2003) han llegado a ecuaciones muy similares a la propuesta por Craig (1961); por tal motivo, la ecuación (1) sigue siendo la definición formal del promedio mundial del contenido isotópico de la lluvia.

La precipitación es la materia prima que alimenta a ríos, lagos y acuíferos. Por ende, la interpretación de las firmas isotópicas tanto de aguas superficiales como subterráneas se debe hacer con base en un buen conocimiento de la distribución espacial y temporal del contenido isotópico de la lluvia local y regional. Es decir, la firma isotópica de la precipitación es el marco de referencia a partir del cual el contenido isotópico de los otros cuerpos de agua adquiere sentido.

En 2014, el Ideam puso en operación la primera fase de la Red Nacional de Isotopía (RNI), a través de la instalación de seis colectores de agua en diferentes departamentos. El diseño original contó con la asistencia del Instituto de Investigación para el Desarrollo de la República de Francia (IRD, por sus siglas en francés). En el diseño se plantea la instalación de treinta y tres estaciones esparcidas por todo el territorio colombiano, incluido el territorio insular de San Andrés. Con este diseño es posible evaluar todo el patrón de circulación atmosférica en el país. En el 2022, se instalaron dos estaciones al oriente del país: una en la Macarena y la otra en Puerto Carreño. En la actualidad, trece estaciones están activas, sin incluir las que hacen parte de la red GNIP.

El funcionamiento de la red RNI no ha estado exenta de dificultades, en especial en sus primeros años de vida. Una proporción importante de los datos iniciales obtenidos exhibe indicios de deterioro de las muestras por problemas durante su recolección o almacenamiento. A medida que se ha adquirido más experiencia, la proporción de datos sospechosos ha disminuido. La mejora observada en el rendimiento de la red RNI se ha debido, en parte, al apoyo suministrado por corporaciones autónomas regionales y por el Servicio Geológico Colombiano. El principal producto de la red RNI es una base de datos de deuterio y oxígeno-18 en muestras de agua lluvia, que estará al servicio de la comunidad científica.

En este numeral, se muestran algunos productos derivados de los datos suministrados por la red RNI y por estaciones que hacen parte de la red GNIP en Colombia. También se incluyen datos publicados de lluvia, y datos contenidos en registros de entidades como la Anla. Solamente se tienen en cuenta series de datos de lluvia de mínimo un año de duración. Como la mayoría de los puntos de observación abordados en este capítulo contienen series de datos de menos de cuatro años, se entiende que los productos aquí mostrados son preliminares. A medida que la base de datos se vaya robusteciendo, las incertidumbres en los resultados serán menores.

Enseguida, se presentarán las rectas meteóricas locales para diferentes sitios en Colombia, estimadas con datos hasta el 2022. Rozanski et al. (1993) demostraron que la estadística descriptiva del contenido isotópico de la lluvia varía en el espacio, y que el valor adquirido por la pendiente de las rectas meteóricas locales (LMWL, por sus siglas en inglés) puede arrojar información sobre las condiciones climáticas en el sitio de observación.

Más adelante se abordarán las variaciones mensuales multianuales evidenciadas en algunos puntos de observación de la lluvia en Colombia. Todas las estaciones exhiben un comportamiento cíclico, con meses que ostentan lluvias isotópicamente enriquecidas, y otros meses con lluvias muy empobrecidas. Estas oscilaciones están íntimamente ligadas al régimen de circulación atmosférico sobre Colombia, el continente americano y los océanos Atlántico y Pacífico.

### 6.3.1 Rectas meteóricas locales (RML)

Las rectas meteóricas locales (RML) son una representación simplificada e intuitiva de la relación promedio $\delta^2H$-$\delta^{18}O$ en un sitio (Putman et al., 2019). Cuando se interpreta una RML, se deben considerar tres aspectos: el rango de variación isotópica, la pendiente de la recta y su intercepto. La Figura 130 presenta una RML hipotética con sus componentes.

Desde un punto de vista hidrogeológico, es importante tener una idea tanto del rango de los valores isotópicos de la lluvia en el punto de observación como de en qué momentos durante un año hidrológico normal se presentan los valores mínimo y máximo. Nótese que, en sitios donde es frecuente encontrar lluvias isotópicamente poco evolucionadas (zonas insulares y costeras), el rango del contenido isotópico de la precipitación será más estrecho.

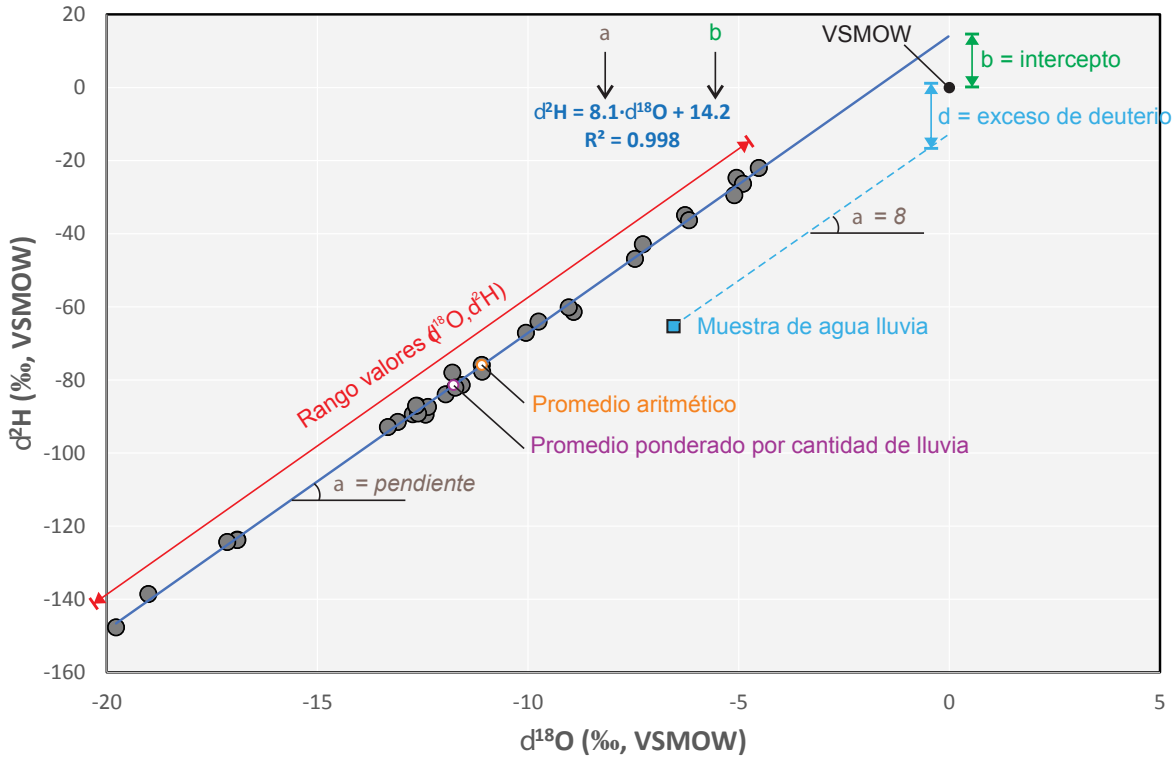



Figura 130. Componentes de una recta meteórica hipotética.

A veces la recarga de los acuíferos no es constante durante todo el año, sino que se presenta con mayor intensidad en algunos meses. En esos casos, el contenido isotópico de las aguas subterráneas de los acuíferos someros, que se recargan con la infiltración directa de la lluvia local, no coincidirá con el promedio ponderado por cantidad de lluvia. Jasechko (2019) presenta un buen resumen sobre cómo interpretar la composición isotópica del agua subterránea en relación con la firma isotópica de la lluvia.

La pendiente de la RML depende de la relación entre los factores de fraccionamiento en equilibrio del deuterio y el oxígeno-18. Esta relación depende a su vez de la temperatura de condensación; cuando esta es cercana a los 30 °C, la pendiente de la recta será ocho. A temperaturas ligeramente por encima de 0 °C, la pendiente estará alrededor de nueve (Merlivat y Jouzel, 1979). Para las condiciones preponderantes en Colombia, se espera que la pendiente de las rectas esté muy cerca de ocho. Cuando la evaporación secundaria es importante, se pueden tener rectas meteóricas con pendientes por debajo de ocho. En este caso, el valor de la pendiente refleja los efectos combinados de fraccionamiento en equilibrio y fraccionamiento cinético.

El intercepto de las rectas meteóricas, llamado *intercepto de deuterio,* depende en esencia de dos aspectos: la pendiente de la recta y la distancia del valor promedio respecto al valor (0,0). Entre más lejos esté el promedio del origen del plano cartesiano, más sensible será el intercepto a cambios en la pendiente. Por ejemplo, en zonas con cotas elevadas, en donde es común tener concentraciones isotópicas empobrecidas en la lluvia, se podría tener un intercepto negativo si las lluvias más enriquecidas están asociadas a un fuerte efecto de la evaporación secundaria.

## Construcción de la recta meteórica local

Para caracterizar la composición isotópica de la lluvia local, el protocolo de muestreo estándar que se utiliza para la red GNIP es recolectar muestras compuestas mensuales (OIEA, 2014). Esta ventana de tiempo es adecuada para estudios hidrogeológicos, y es el protocolo adoptado para la red RNI y para la mayoría de las redes isotópicas regionales implementadas en Colombia. Sin embargo, también es posible recolectar muestras compuestas en otras ventanas de tiempo, siempre y cuando el muestreo se haga en forma sistemática y se minimice el riesgo de evaporación de la muestra durante el periodo de recolección.

En relación con la longitud mínima que deberían tener las series de datos para estimar rectas meteóricas confiables, el sentido común sugiere que entre más larga sea la serie, menor será la incertidumbre de la estimación de la recta. Putman et al. (2019) indican que la longitud de registro requerida para calcular las RML depende de la escala de tiempo del fenómeno que se desea estudiar. Para aplicaciones de tiempo de residencia cortos, el conjunto de datos utilizado para calcular la recta debe ser coetánea con la recopilación de otras muestras del proyecto. Es decir, el proyecto debe definir su propia recta meteórica local. Para aplicaciones de mayor tiempo de residencia, se debe usar un conjunto de datos largo, pero no necesariamente tiene que ser coetáneo. Es decir, se pueden utilizar series históricas construidas con datos de lluvia recolectados antes en regiones cercanas a las del proyecto. En general, Putman et al. (2019) recomiendan mínimo cuatro años de observación. Ellos encontraron que para series de datos más largas, las variaciones obtenidas en la actualización de la recta eran pequeñas.

Como la mayoría de las estaciones abordadas en el presente capítulo tienen series históricas de menos de cuatro años, se debe entender que las rectas aquí definidas son preliminares. Las rectas que corresponden a las estaciones de la red RNI deben ser actualizadas a medida que se recopilen más datos. Por consiguiente, los investigadores interesados en utilizar las rectas definidas en este Estudio Nacional del Agua, en la medida de lo posible, deben actualizar las rectas con la información más reciente de la base de datos a disposición de la comunidad científica.

En relación con la técnica estadística para estimar la recta de mejor ajuste, tradicionalmente se ha usado el método de mínimos cuadrados (OLSR, por sus siglas en inglés); este es el método utilizado por defecto en aplicaciones como Microsoft Excel; sin embargo, algunos investigadores cuestionan su conveniencia. Por ejemplo, Crawford et al. (2014)

sugieren que el método OLSR es más apropiado cuando se desea desarrollar algún método predictivo. Es importante recalcar que las rectas meteóricas no indican causalidad alguna; es decir, la recta meteórica no sugiere que el oxígeno-18 da lugar al deuterio. Simplemente, es una asociación lineal, porque ambos isótopos son afectados por los mismos fenómenos físicos aunque difieren en la magnitud de su respuesta.

Otro método de ajuste que ha sido utilizado por el OIEA en sus reportes estadísticos de la red GNIP (por ejemplo, en IAEA, 1992) es el del eje principal reducido (RMA, por sus siglas en inglés). Un tercer método menos empleado es el del eje principal (MA, por sus siglas en inglés), a veces denominado como regresión ortogonal. La ventaja de estos dos últimos métodos en relación con el método OLSR es que tienen en cuenta errores asociados tanto con la variable independiente como con la variable dependiente (Argirou y Lykoudis, 2006).

Los tres métodos de regresión lineal mencionados tienen en común tratar de minimizar un índice que representa la diferencia entre los valores observados y los predichos; en lo que se diferencian entre sí es en el índice usado. OLSR busca minimizar la distancia vertical entre el valor observado y la recta de mejor ajuste; MA busca minimizar la distancia perpendicular a la recta de mejor ajuste; y RMA pretende minimizar el área del triángulo formado entre la recta de mejor ajuste y las rectas horizontal y vertical que pasan por el punto observado (Figura 131, parte a).

Carroll y Ruppert (1996) indican que los métodos MA y RMA son adecuados cuando las dos variables (dependiente e independiente) comparten la misma unidad de medida y cuando son afectados por los mismos procesos. Por consiguiente, ambos métodos parecen ser más apropiados para definir las rectas meteóricas locales, porque los dos isótopos son expresados con la misma unidad de medida y porque ambos están afectados por los mismos procesos de fraccionamiento isotópico (Crawford et al., 2014).

Un cuarto método de ajuste fue propuesto por Hughes y Crawford (2012) y fue denominado como «mínimos cuadrados ponderados por cantidad de lluvia» (PWLSR, por sus siglas en inglés). En esencia, este método es similar al OLSR, salvo que asigna un peso a cada dato dependiendo de la cantidad de lluvia que represente. Es decir, en este método, los datos de los meses más lluviosos reciben más importancia que los datos de los meses menos húmedos. Esta estrategia es empleada con frecuencia en hidrogeología porque, en términos de recarga de acuíferos, hay más oportunidad de recargar las aguas subterráneas en los meses más lluviosos.

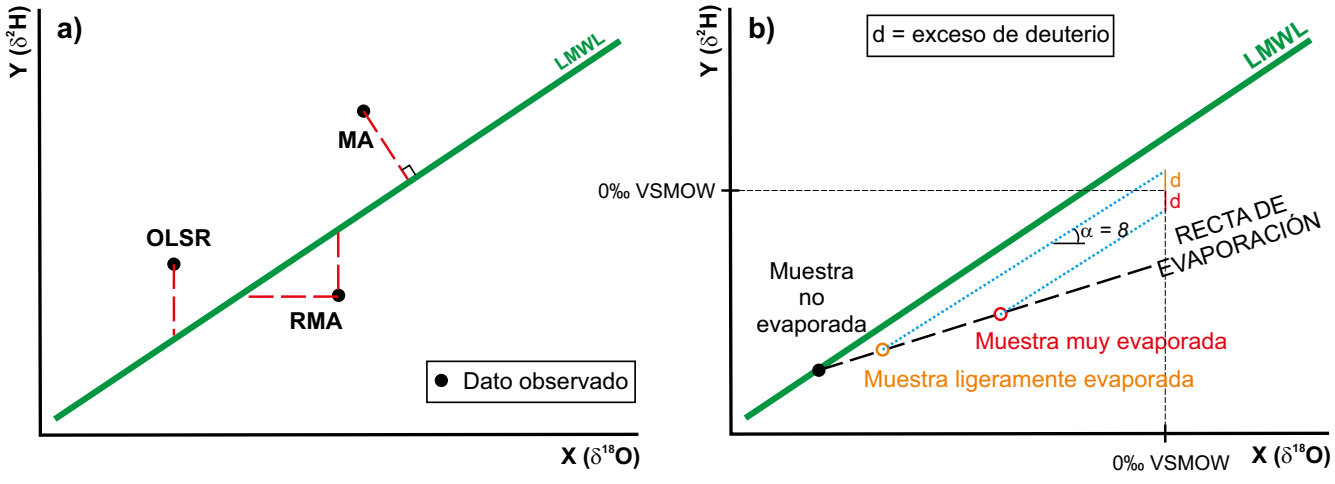



Figura 131. (a) Métodos alternativos de regresión lineal. (b) Efectos de la evaporación en el exceso de deuterio. (Tomado de Crawford et al., 2014).

Con el fin de apreciar las diferencias en las rectas de mejor ajuste obtenidas con los cuatro métodos mencionados, en la Figura 132 se muestran las rectas meteóricas calculadas para dos estaciones que se diferencian entre sí en la longitud de las series históricas de datos. La primera estación es GNIP Barranquilla; esta estación estuvo activa entre los años 1972 y 1989, aunque con muchos vacíos, en especial durante los meses más secos; la serie completa consta de 101 registros, pero 30 de ellos exhiben señales de evaporación. La otra estación es RNI La Macarena; esta estación se activó en octubre de 2016, pero ha presentado dificultades en su operación; su serie completa solo tiene 21 registros, pero ocho de ellos (el 38 %) parece que corresponden a muestras deterioradas durante el muestreo. Para las dos estaciones se utilizan dos conjuntos de datos: uno con la serie completa; en el otro se han removido los registros cuyo exceso de deuterio es menor que 5 ‰ VSMOW.

En general, los resultados indican que entre más larga es la serie de datos, menores son las diferencias detectadas entre los cuatro métodos de regresión lineal. Por tanto, la selección del método de regresión no es un paso crítico para estaciones con más de cuatro años de observación. Nótese que los rangos de incertidumbre tanto para la pendiente como para el intercepto son menores en la recta de la estación GNIP-Barranquilla (más datos) respecto a la estación RNI-La Macarena (menos datos).

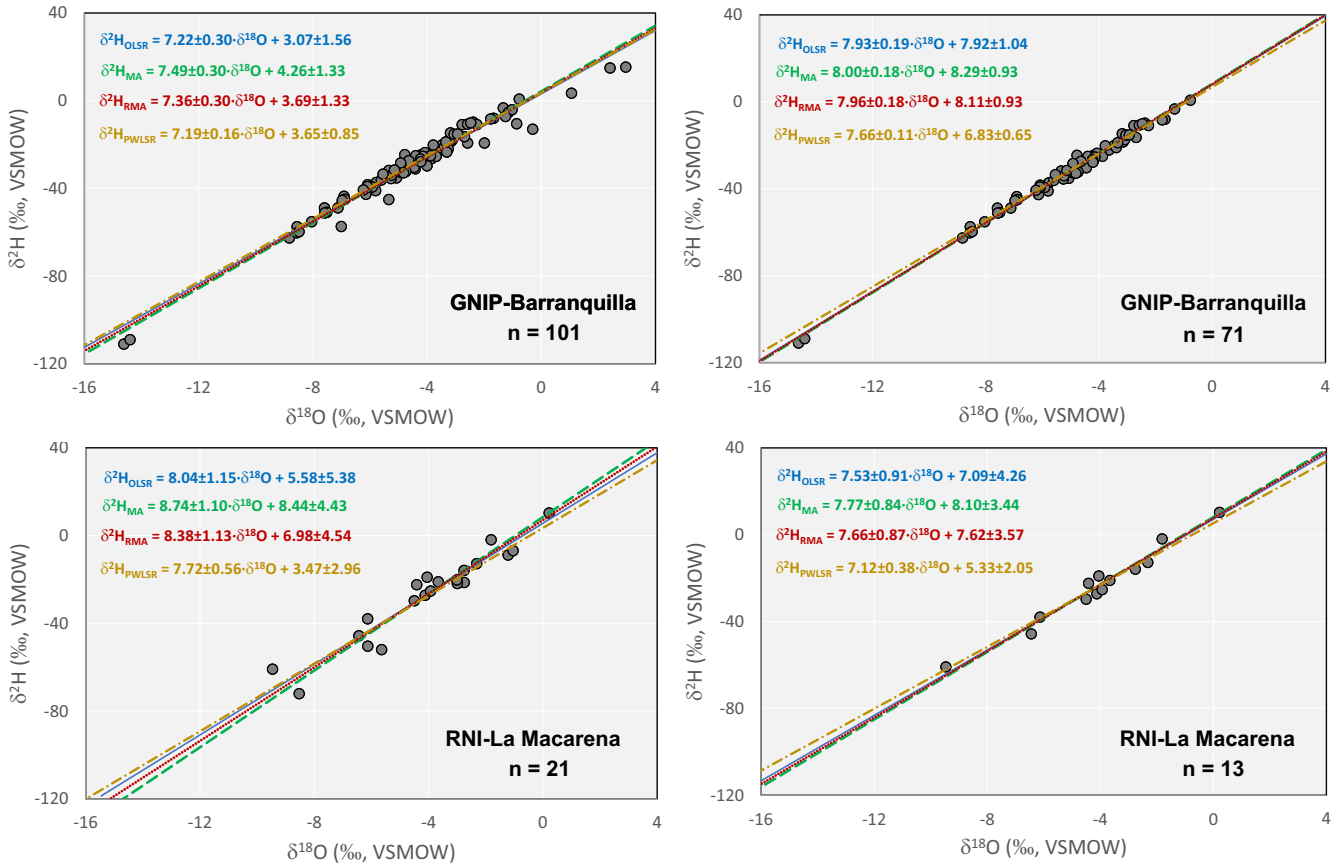



Figura 132. Rectas meteóricas locales estimadas para dos estaciones usando cuatro métodos de regresión.

En los dos gráficos de la derecha en la Figura 132, se han removido todos los registros cuyos excesos de deuterio están por debajo de 5 ‰ VSMOW. El exceso de deuterio se utiliza con frecuencia para detectar muestras de lluvia que han sufrido algún deterioro durante la recolección o almacenamiento de la muestra; la evaporación es el deterioro más común. La evaporación causa que el exceso de deuterio disminuya (Figura 131, parte b). Cuando se analizan lluvias aisladas, es probable encontrar eventos con un exceso de deuterio bajo, incluso negativo; pero cuando se analizan muestras compuestas mensuales de lluvia, lo normal es que su exceso de deuterio fluctúe alrededor del 10 ‰ VSMOW, sobre todo si la muestra ha sido obtenida en el trópico y en ambientes que no son áridos. Por ende, la presencia de un exceso de deuterio bajo puede sugerir algún problema de evaporación durante la recolección de la muestra de lluvia. La dificultad es seleccionar el umbral del valor del exceso de deuterio por debajo del cual se debe descartar una muestra por sospechas de evaporación por razones ajenas a cualquier fenómeno natural. Lamentablemente, la selección de ese umbral es subjetiva; si este es muy alto, se pueden descartar muestras válidas; si es muy bajo, se pueden incorporar muestras que no son representativas. Peor aún, no hay manera de saber si muestras con un exceso de deuterio ligeramente por encima del umbral en realidad están afectadas por un protocolo inadecuado de muestreo. El OIEA suele descartar muestras enriquecidas que están más allá de tres desviaciones estándar de la media. Pero este método no funciona si el problema de muestreo ocurre de forma reiterada en el punto de observación.

En la actualidad, se lleva a cabo una investigación con las muestras recolectadas en la Red Quindiana de Isótopos en la Precipitación (QNIP) operada por la CRQ. Para junio de 2022 se habían recolectado y analizado 254 muestras compuestas mensuales de precipitación. El muestreo es muy meticuloso y se utilizan dispositivos especialmente diseñados para minimizar la evaporación de las muestras. La media del exceso de deuterio para el set completo de datos es 11,99 ‰ y la desviación estándar 2,65 ‰. Tres desviaciones estándar por debajo de la media dan un valor de 4,04 ‰; solo dos muestras tienen un exceso de deuterio menor que ese valor, y corresponden a meses atípicamente secos. Ocho muestras tienen un exceso de deuterio entre 4 ‰ y 6 ‰. Las demás muestras están por encima del 6 ‰. Por tanto, un umbral de 5 ‰ para el exceso de deuterio parece ser conservativo y es el valor adoptado en el presente estudio para descartar datos dudosos.

La exclusión de muestras con un valor bajo en el exceso de deuterio no siempre provoca que la pendiente de la recta aumente. Si los datos excluidos están relativamente enriquecidos, la nueva pendiente será mayor; eso ocurre con la estación GNIP-Barranquilla. Pero si los datos excluidos están en la parte inferior de la recta, la nueva pendiente será menor; eso se observa en la estación RNI-La Macarena.

El método MA sobreestima la pendiente en los cuatro casos presentados en la Figura 132. El método PWLSR subestima la pendiente, aunque tiene a su favor presentar las menores incertidumbres en la estimación de la pendiente y el intercepto. Este método fue propuesto para aplicaciones hidrogeológicas, pero podría no ser el más adecuado para otras aplicaciones. Los métodos OLSR y RMA ofrecen pendientes intermedias; y, entre los dos, las menores incertidumbres corresponden al método RMA. Por lo anterior, en este documento se recomienda utilizar el método RMA para generar las rectas meteóricas locales. En un documento técnico anexo al ENA 2022, se encuentran las rectas meteóricas generadas con los cuatro métodos, así como toda la estadística descriptiva de los datos isotópicos de las muestras de lluvia abordada en el ENA 2022.

## Resultados

Se evaluaron datos de muestras compuestas mensuales de 34 puntos de observación. Trece corresponden a la Red Nacional de Isotopía (RNI); las estaciones RNI-Quibdó, RNI-Buenaventura y RNI-San Andrés recolectan eventos de lluvia. Para este informe, esos datos han sido agregados a periodos mensuales. Diecisiete puntos pertenecen a la base de datos GNIP; de estos, solo cuatro son estaciones activas: GNIP-Bogotá (operada por el Ideam), GNIP-Tulenapa (operada por Corpourabá), y GNIP-Toluviejo y GNIP-El Tesoro (operadas por Carsucre). Dos puntos tienen información del expediente LAV0001-00-2020 de la Anla. Los datos son de la empresa Minera de Cobre Quebradona S. A. S.

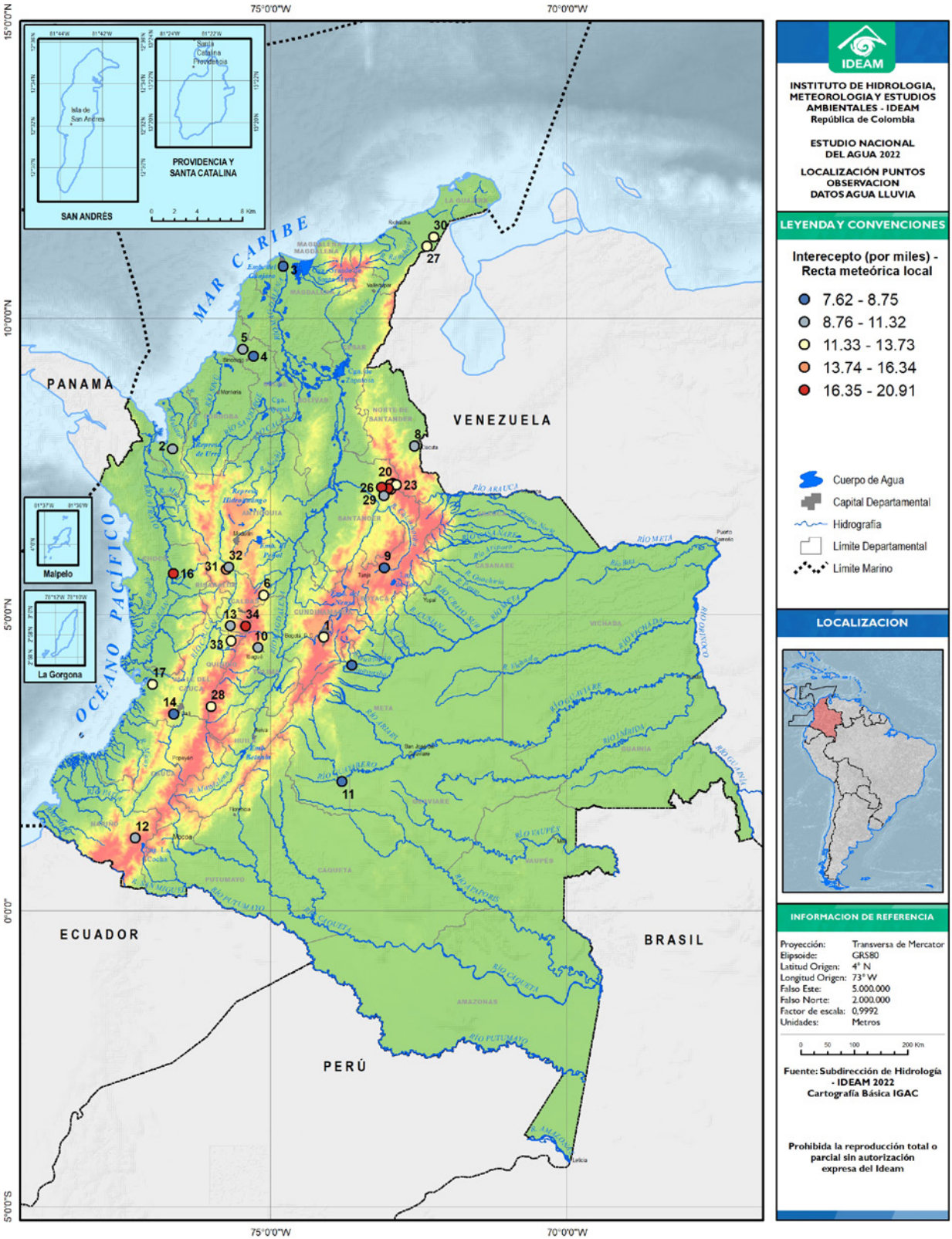



Figura 133. Localización puntos de observación con datos de agua lluvia.

Otro punto pertenece a la Red Quindiana de Isótopos en la Precipitación (QNIP) operada por la CRQ. El otro punto pertenece a la Red Isotópica de la Cuenca del Río Otún, operada por la empresa Aguas y Aguas de Pereira con la asistencia de la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP).

La Tabla 45 contiene las rectas meteóricas locales estimadas con el método de regresión RMA para los 34 puntos de observación, así como los promedios ponderados por cantidad de lluvia. Las series utilizadas son las que poseen únicamente registros con un exceso de deuterio igual o mayor que 5 ‰ VSMOW. Las rectas fueron estimadas con la librería lmodel2 del ambiente R, versión 1.7-3 publicada en 2018 (Legendre, 2022). El mapa de la Figura 133 presenta la localización de las 34 estaciones y los valores de exceso de deuterio para cada promedio ponderado por cantidad de lluvia.

Las pendientes estimadas varían entre 7,56 y 8,89. Teniendo en cuenta las incertidumbres asociadas a las pendientes, no es sorpresa que ellas fluctúen alrededor de ocho. La gráfica (izq.) de la Figura 134 compara las pendientes por región. No se observan grandes diferencias entre las regiones Andina, Atlántico y Pacífico. Los bajos valores de los Llanos y la zona insular pueden ser resultado de evaporación secundaria en los meses menos húmedos.

Tabla 45. Rectas meteóricas locales obtenidas con el método RMA y promedios ponderados por cantidad de lluvia.

| id | Estación | Latitud | Longitud | Altitud | Región | n | m | std_m | b | std_b | H2w | O18w | dw_5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | GNIP-Bogotá | 4.62166 | -74.10344 | 2558 | Andina | 297 | 8.25 | 0.08 | 13.49 | 0.74 | -70.2 | -10.17 | 11.2 |
| 6 | RNI-Bolivia | 5.32827 | -75.11200 | 1879 | Andina | 12 | 8.24 | 0.19 | 12.81 | 1.24 | -45.8 | -7.12 | 11.2 |
| 7 | RNI-Bucaramanga | 7.14139 | -73.11833 | 996 | Andina | 57 | 8.16 | 0.24 | 10.69 | 1.30 | -35.9 | -5.76 | 10.2 |
| 8 | RNI-Carmen de Tonchalá | 7.84669 | -72.56667 | 305 | Andina | 31 | 8.23 | 0.34 | 10.68 | 1.01 | -23.4 | -4.18 | 10.1 |
| 9 | RNI-Duitama | 5.78755 | -73.08178 | 2491 | Andina | 47 | 7.89 | 0.18 | 8.01 | 1.32 | -58.0 | -8.38 | 9.1 |
| 10 | RNI-Ibagué | 4.43563 | -75.20883 | 1183 | Andina | 81 | 8.04 | 0.13 | 10.27 | 0.94 | -50.9 | -7.62 | 10.1 |
| 12 | RNI-Pasto | 1.22565 | -77.28329 | 2504 | Andina | 57 | 8.13 | 0.18 | 10.30 | 1.78 | -76.8 | -10.72 | 9.0 |
| 13 | RNI-Pereira | 4.80463 | -75.67432 | 1492 | Andina | 73 | 7.91 | 0.20 | 9.89 | 1.79 | -67.3 | -9.79 | 11.1 |
| 19 | GNIP-El Picacho | 7.11278 | -72.96972 | 3451 | Andina | 19 | 8.13 | 0.29 | 14.68 | 3.15 | -84.0 | -12.13 | 13.0 |
| 20 | GNIP-La Casita | 7.20833 | -72.93806 | 2533 | Andina | 18 | 8.52 | 0.37 | 15.66 | 3.17 | -61.6 | -9.09 | 11.1 |
| 21 | GNIP-Tona | 7.19861 | -72.97389 | 1872 | Andina | 19 | 8.31 | 0.33 | 14.22 | 2.68 | -62.5 | -9.23 | 11.3 |
| 22 | GNIP-La Galvicia | 7.12556 | -73.06000 | 1803 | Andina | 20 | 8.45 | 0.26 | 15.64 | 1.96 | -48.6 | -7.63 | 12.5 |
| 23 | GNIP-Berlín | 7.18944 | -72.87167 | 3323 | Andina | 20 | 8.04 | 0.24 | 12.49 | 2.49 | -81.7 | -11.69 | 11.8 |
| 24 | GNIP-San Antonio | 7.10222 | -73.06944 | 1428 | Andina | 20 | 8.30 | 0.16 | 13.92 | 1.30 | -59.2 | -8.82 | 11.3 |
| 25 | GNIP-La Mariana | 7.12556 | -73.01028 | 2290 | Andina | 17 | 8.46 | 0.33 | 16.79 | 2.84 | -61.8 | -9.28 | 12.4 |
| 26 | GNIP-Ideam | 7.14472 | -73.12500 | 839 | Andina | 11 | 8.89 | 0.60 | 17.27 | 3.87 | -43.4 | -6.91 | 11.9 |
| 28 | GNIP-Albania | 3.44052 | -76.00170 | 3661 | Andina | 11 | 8.18 | 0.58 | 12.04 | 6.35 | -84.3 | -11.85 | 10.5 |
| 29 | GNIP-Piedecuesta | 7.00000 | -73.08333 | 1074 | Andina | 14 | 8.11 | 0.31 | 11.32 | 2.26 | -55.7 | -8.27 | 10.4 |

| id | Estación | Latitud | Longitud | Altitud | Región | n | m | std_m | b | std_b | H2w | O18w | dw_5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 31 | Anla-Quebradona | 5.75657 | -75.74951 | 2052 | Andina | 14 | 8.39 | 0.22 | 16.34 | 2.14 | -68.7 | -10.11 | 12.1 |
| 32 | Anla-San Antonio | 5.79871 | -75.70329 | 919 | Andina | 13 | 8.16 | 0.22 | 10.74 | 1.77 | -67.5 | -9.61 | 9.3 |
| 33 | QNIP-CRQ | 4.55611 | -75.66361 | 1513 | Andina | 47 | 8.15 | 0.14 | 13.73 | 1.50 | -75.4 | -10.94 | 12.1 |
| 34 | A&A-La Asomadera | 4.79935 | -75.41488 | 4118 | Andina | 26 | 8.38 | 0.28 | 18.17 | 3.48 | -88.4 | -12.74 | 13.5 |
| 2 | GNIP-Tulenapa | 7.78986 | -76.65085 | 33 | Atlántico | 86 | 8.10 | 0.11 | 10.62 | 0.62 | -43.9 | -6.73 | 10.0 |
| 3 | GNIP-Barranquilla | 10.88000 | -74.78000 | 25 | Atlántico | 71 | 7.96 | 0.18 | 8.11 | 0.93 | -34.2 | -5.35 | 8.7 |
| 4 | GNIP-El Tesoro | 9.35707 | -75.28917 | 196 | Atlántico | 147 | 7.86 | 0.12 | 8.38 | 0.63 | -38.0 | -5.90 | 9.2 |
| 5 | GNIP-Toluviejo | 9.47780 | -75.46900 | 42 | Atlántico | 25 | 8.14 | 0.39 | 9.45 | 1.86 | -32.8 | -5.19 | 8.7 |
| 27 | GNIP-Carraipia | 11.21944 | -72.36333 | 123 | Atlántico | 9 | 8.57 | 0.74 | 11.91 | 3.35 | -26.3 | -4.56 | 10.2 |
| 30 | GNIP-Maicao | 11.37261 | -72.24742 | 56 | Atlántico | 11 | 8.63 | 0.51 | 12.33 | 2.64 | -36.0 | -5.64 | 9.1 |
| 18 | RNI-San Andrés | 12.58786 | -81.70108 | 1 | Insular | 47 | 7.56 | 0.42 | 9.90 | 0.99 | -15.6 | -3.41 | 11.7 |
| 11 | RNI-La Macarena | 2.17617 | -73.79344 | 229 | Llanos | 13 | 7.66 | 0.87 | 7.62 | 3.57 | -29.1 | -4.84 | 9.6 |
| 15 | RNI-Villavicencio1 | 4.13750 | -73.62500 | 434 | Llanos | 44 | 7.88 | 0.24 | 8.75 | 1.18 | -39.1 | -6.02 | 9.1 |
| 14 | RNI-Cali | 3.31771 | -76.63669 | 1699 | Pacífico | 49 | 7.66 | 0.22 | 8.09 | 2.21 | -73.5 | -10.65 | 11.7 |
| 16 | RNI-Quibdó | 5.69056 | -76.64378 | 55 | Pacífico | 23 | 8.62 | 0.67 | 20.91 | 5.16 | -49.9 | -8.20 | 15.6 |
| 17 | RNI-Buenaventura | 3.82011 | -76.99239 | 14 | Pacífico | 19 | 8.10 | 0.71 | 13.04 | 3.73 | -32.7 | -5.57 | 11.9 |

**Nota:** coordenadas MAGNA-SIRGAS. **Altitud** en m s. n. m. **n** = número de datos. **m** = pendiente. **std_m** = desviación estándar de la pendiente. **b** = intercepto. **std_b** = desviación estándar intercepto. **H2w** y **O18w** = deuterio y oxígeno-18, ambos ponderados por cantidad de lluvia. **dw** = exceso de deuterio, dw = H2w – 8*O18w.

La gráfica derecha de la Figura 134 compara el intercepto de deuterio por región. De nuevo, los valores más bajos son para la región de los Llanos y para la zona insular, posiblemente debido a efectos de evaporación secundaria sobre las gotas de lluvia. El intercepto para la zona Atlántico también sugiere una presencia importante de evaporación. El valor más alto de intercepto de deuterio es para la recta meteórica local de la estación RNI-Quibdó; esta estación ostenta un intercepto de 20,91 ‰. Muy posiblemente, la precipitación en esta parte de Colombia indica un papel preponderante en el reciclaje hídrico regional.

La Figura 135 muestra los promedios para cada estación, discriminados por región. Las rectas que allí aparecen podrían ser consideradas como rectas meteóricas regionales. La recta para la región Pacífico ostenta una gran incertidumbre debido a que está construida con únicamente tres estaciones. Las rectas fueron construidas con el método OLSR, pero como cada punto representa un promedio ponderado por cantidad de precipitación, esas rectas podrían asemejarse a las obtenidas por el método PWLSR.

De las tres rectas mostradas en la Figura 135, la región Atlántico exhibe el menor rango y los promedios están más cerca del punto (0,0) que representa la composición promedio del mar. Es decir, las lluvias que ocurren en esta parte del país son menos evolucionadas que en otras regiones. El caso extremo de aguas isotópicamente poco evolucionadas lo ofrece el promedio de la

estación instalada en la Isla de San Andrés (punto 18); seguramente, las precipitaciones que allí suceden son condensaciones de la humedad generada en el mar Caribe.

La región Andina es la que presenta una mayor variabilidad isotópica. Se sabe que las precipitaciones que suceden en esta región son resultado de condensación de humedades con origen diverso, como el mar Caribe, la Orinoquía, la Amazonía, el Pacífico y reciclaje local (ver, por ejemplo, Hoyos et al., 2017). El rasgo más sobresaliente de la recta del Pacífico es su intercepto de deuterio, el cual es mayor que el de las otras dos rectas. La posición de esta recta, ligeramente por encima de las otras dos, es el resultado de un mayor exceso de deuterio en las muestras compuestas mensuales obtenidas en la región del Pacífico. Una posible explicación para valores altos de exceso de deuterio es la condensación de humedades que se generan por reciclaje hídrico. Es decir, la isotopía sugiere que al menos parte de las precipitaciones que se registran este territorio pueden venir por evapotranspiración en la misma región.

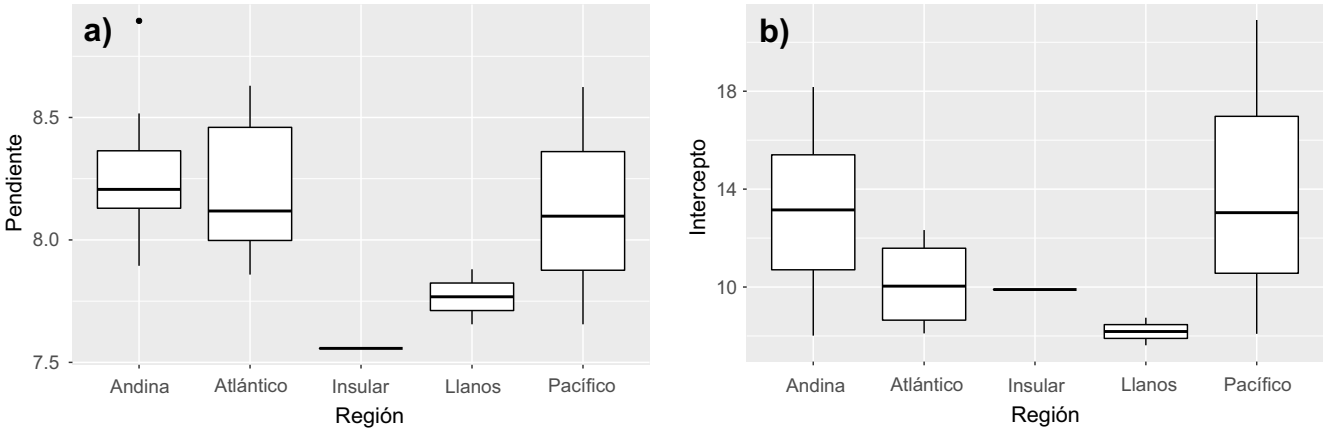



Figura 134. Pendiente e intercepto de la recta meteórica local, por región.

La Figura 136 compara el exceso de deuterio de cada promedio con la cota del punto de observación. Para la región Andina, es evidente que, a mayor altura, las precipitaciones tienden a estar más empobrecidas en isótopos pesados; en este caso, en oxígeno-18; este es el comportamiento esperado. Hay que tener precaución en interpretar esta tendencia como un gradiente isotópico altitudinal, ya que no toda la región Andina puede estar afectada por los mismos fenómenos atmosféricos al mismo tiempo. Los gradientes isotópicos altitudinales deben estimarse para regiones muy homogéneas. En el numeral 6.4 se ilustra el uso del gradiente isotópico altitudinal con un estudio de caso.

En la región Atlántico, no se observa gradiente isotópico altitudinal porque esta parte de Colombia es relativamente plana, exceptuando la Sierra Nevada de Santa Marta. Por consiguiente, para proyectos en el Caribe, no tiene sentido construir gradientes isotópicos altitudinales.

Finalmente, es posible proponer una «recta meteórica nacional», pero su utilidad es muy cuestionable. Al ser un promedio de rectas meteóricas que representan condiciones ambientales diferentes en el país, no sorprende que la recta nacional sea muy similar a la recta mundial. Todo proyecto de hidrología isotópica que requiera responder preguntas concretas debe, en el peor de los casos, emplear alguna recta meteórica regional próxima como marco referencia. De todas formas, las ecuaciones (2), (3) y (4) presentan lo que sería la recta meteórica de Colombia, generadas con los métodos OLSR, MA y RMA, respectivamente.

$$\delta\,^{2}H_{OLSR} = 7.96 \pm 0.04 \cdot \delta\,^{18}O + 10.28 \pm 0.31 \quad (2)$$

$$\delta\,^{2}H_{MA} = 8.03 \pm 0.04 \cdot \delta\,^{18}O + 10.74 \pm 0.27 \quad (3)$$

$$\delta\,^{2}H_{RMA} = 8.00 \pm 0.04 \cdot \delta\,^{18}O + 10.52 \pm 0.27 \quad (4)$$

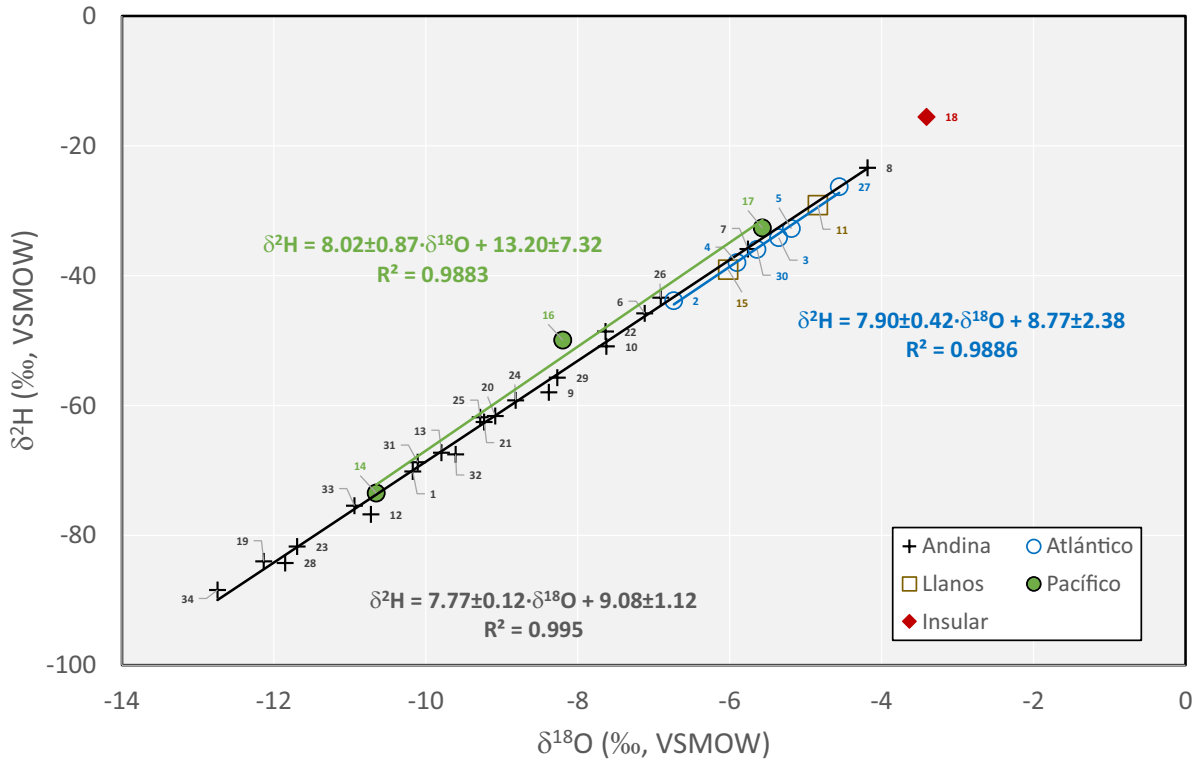



Figura 135. Promedios ponderados por cantidad de lluvia.

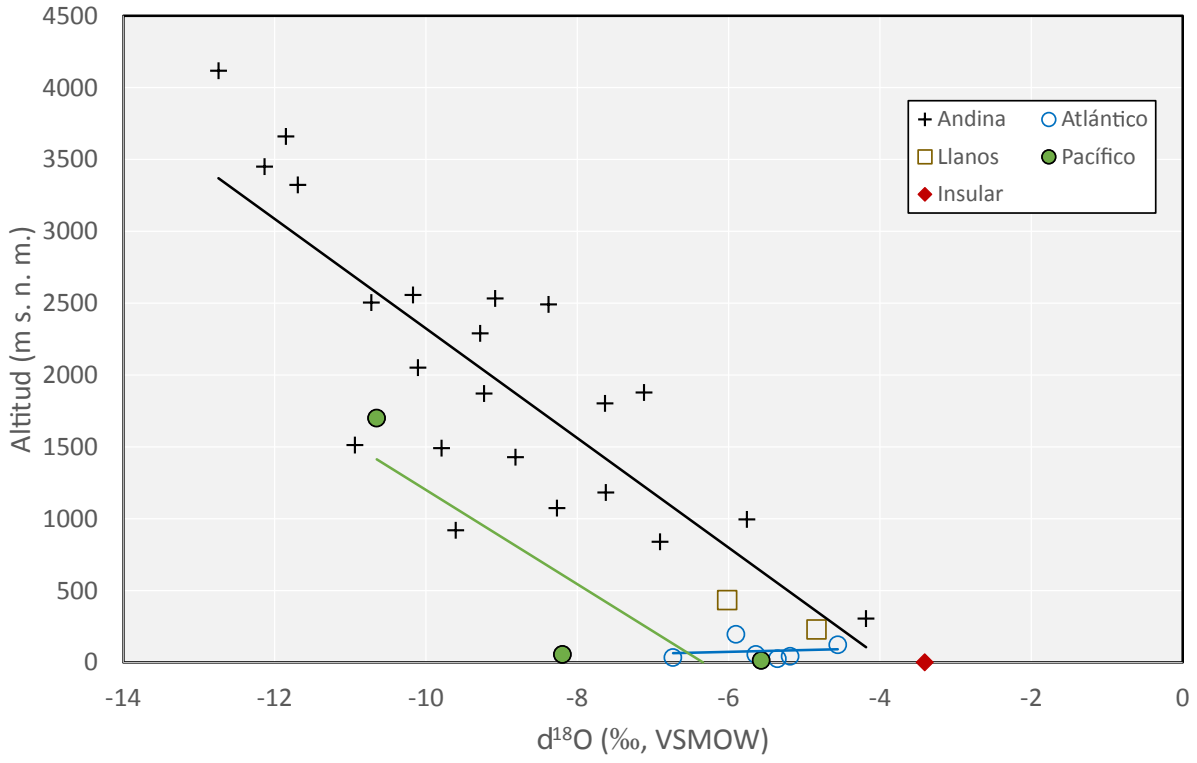



Figura 136. Oxígeno-18 versus altitud, promedios ponderados por cantidad de lluvia.

### 6.3.2 Variación temporal de la composición isotópica de la lluvia en Colombia

La firma isotópica de la lluvia en Colombia exhibe un ciclo anual bien definido. Los meses isotópicamente más enriquecidos son enero, febrero o marzo, y los más empobrecidos son mayo o junio. Las variaciones temporales en la composición isotópica están íntimamente ligadas a cambios en el patrón de circulación atmosférica sobre el país. En general, todas las estaciones evaluadas en el ENA 2022 muestran un comportamiento similar, lo que sugiere que fenómenos sinópticos o, al menos a mesoescala, son los arquitectos de la firma isotópica en la lluvia. Las diferencias entre estaciones son generadas por factores locales, tanto meteorológicos como geográficos. El reciclaje hídrico a escala regional también debe jugar un papel importante.

El principal fenómeno que controla el régimen de precipitación sobre Colombia es la migración anual de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). A su vez, la posición de la ZCIT condiciona otros fenómenos, como los vientos alisios, y las corrientes en chorro de bajo nivel, como el Chorro del Chocó, que transportan humedad hacia el continente. Por tanto, la variación mensual del contenido isotópico de la lluvia debe ser evaluada tomando como referencia la ZCIT.

El punto de observación con más datos isotópicos de la lluvia en Colombia es la estación GNIP-Bogotá, operada por el Ideam. Esta estación inició actividad en julio de 1971, y en la actualidad sigue aportando datos, aunque presenta algunos vacíos, en especial, durante la década de los años 1990. El análisis que sigue a continuación se centra en esta estación.

La Figura 137 presenta: (a) la variación mensual del oxígeno-18, junto con la precipitación mensual promedio multianual en Bogotá, estimada con información de los meses en donde hay disponibles datos isotópicos; y (b) la variación mensual del exceso de deuterio, junto con la posición aproximada del eje de la ZCIT sobre el continente suramericano, tomado de Waliser y Gautier (1993). La variación del deuterio es muy similar al oxígeno-18 y, por tal motivo, solo el oxígeno-18 se tiene en cuenta en esta discusión.

Para la estación GNIP-Bogotá, el mes más enriquecido en oxígeno-18 es enero (mediana = -4,7 ‰ VSMOW). Sin embargo, el rango intercuartil para el mes de febrero abarca valores ligeramente más enriquecidos que en enero; y marzo es muy similar al primer mes del año. Para todos los puntos de observación considerados en el ENA 2022, el mes más enriquecido pertenece a uno de esos tres meses. En esa época del año, la ZCIT está en su posición más austral, y los vientos alisios están fortalecidos, llevando humedad hacia el continente.

Sakamoto et al. (2011) estiman que, entre los meses de enero y marzo, la mayor fuente de humedad que alimenta los sistemas convectivos a mesoescala que ocurren en el occidente de Colombia proviene del Caribe y del Atlántico Tropical Norte. Estas fuentes de humedad, relativamente cercanas a territorio continental colombiano, explican por qué en los primeros tres meses del año las lluvias están enriquecidas desde el punto de vista isotópico.

Las lluvias de los primeros dos meses del año también comparten otra característica: en la mayoría de las estaciones, enero y febrero exhiben altos valores de exceso de deuterio. En el numeral anterior, se mencionó que el exceso de deuterio se utiliza como filtro para descartar muestras sospechosas de haber sufrido evaporación durante su proceso de recolección; no obstante, la utilidad real de este parámetro es como indicador de fraccionamiento isotópico cinético (Dansgaard, 1964). Fraccionamiento cinético ocurre durante la evaporación y su ocurrencia ocasiona que las rectas meteóricas locales no crucen por el origen del plano cartesiano [0 ‰, 0 ‰]. Varios factores influyen en el fraccionamiento cinético, entre los que sobresalen la humedad relativa y la velocidad del viento en el sitio de evaporación; por ejemplo, entre menor es la humedad relativa, mayor es el fraccionamiento cinético. De hecho, el valor del intercepto de deuterio de la recta meteórica mundial (10 ‰ VSMOW) corresponde a una humedad relativa del 85 % (Clark y Fritz, 1997). Es decir que el vapor de agua generado sobre la superficie del mar, que después da lugar a las precipitaciones sobre los continentes, se forma bajo una humedad relativa predominante del 85 %.

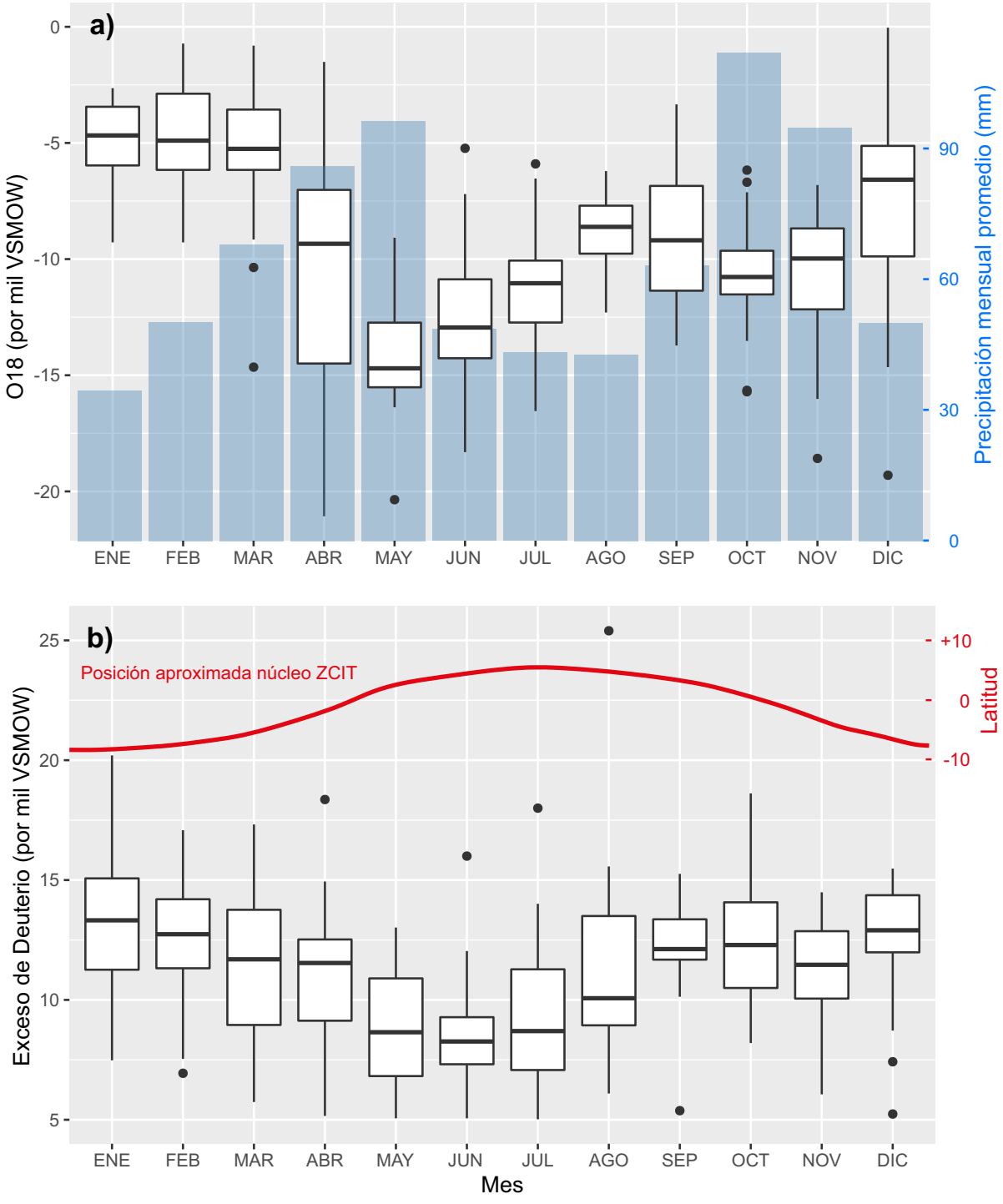



Figura 137. Oxígeno-18 y exceso de deuterio, estación GNIP-Bogotá
Posición de ZCIT tomada de Waliser y Gautier (1993).

Algunas estaciones GNIP localizadas en el Caribe presentan lluvias con un exceso de deuterio mayor que 10‰ VSMOW en los meses de enero y febrero; por ejemplo, GNIP-Habana en Cuba (12,1‰) y GNIP-Santana en República Dominicana (12,7‰). Es posible que la causa de este comportamiento esté relacionada con bajas humedades relativas o fuertes vientos en esos dos meses (ver, por ejemplo, Benetti et al., 2014). Por lo anterior, el relativo alto valor del exceso de deuterio para la lluvia de enero y febrero podría ser explicado, en parte, por su fuente de humedad localizada en el Caribe.

Abril es un mes de transición entre los meses más enriquecidos y los más empobrecidos. Su alta variación puede ser resultado de la confluencia de diversos orígenes de humedad que dan lugar a las lluvias. Sakamoto et al. (2011) mencionan dos fuentes adicionales de humedad para el mes de abril: el Pacífico peruano-chileno y el Pacífico Tropical. El Pacífico peruano-chileno se localiza aproximadamente a una latitud de 20° sur; a esta latitud, la concentración isotópica del mar está entre 0,5‰ y 1‰ más empobrecido respecto al Caribe (LeGrande y Schmidt, 2006). La humedad generada en el Pacífico peruano-chileno es transportada por el Chorro del Chocó e ingresa al país por la costa del Pacífico. Por ende, este componente podría causar una disminución en la concentración isotópica de las lluvias en el mes de abril.

Mayo y junio son los meses más empobrecidos. En esta época del año, la ZCIT se desplaza hacia el norte, provocando en gran parte del país la primera temporada lluviosa. Tradicionalmente, se habla del «efecto de cantidad» para explicar la composición isotópica de la precipitación en el trópico. Este «efecto» sugiere que, en los meses más lluviosos, la composición isotópica tiende a estar más empobrecida en relación con los meses menos lluviosos. Sin embargo, para la estación GNIP-Bogotá, y para la mayoría de las estaciones abordadas en este estudio, dicho «efecto» no es evidente. Muchos investigadores también han encontrado ausencia del «efecto de cantidad» en la lluvia en muchas partes del trópico (por ejemplo, Vimeux et al., 2011).

Las lluvias muy empobrecidas son la manifestación de aguas isotópicamente evolucionadas. Si se asume que la evaporación del mar es el punto de partida, las lluvias podrían evolucionar por dos caminos: (a) viajando largas trayectorias sobre el continente, dando lugar a sucesivas condensaciones, de tal forma que el vapor remanente cada vez se hace más empobrecido, de acuerdo con el enfoque tradicional de destilación Rayleigh; o (b) a través de mezclas con humedad reciclada sobre el continente debido a evapotranspiración. Este último camino da lugar a lluvias con un alto exceso de deuterio. En la Figura 137 b se advierte que mayo y junio son los meses con el menor valor de exceso de deuterio. Por lo anterior, la respuesta más plausible es que la fuente de humedad que da lugar a las lluvias en estos dos meses debe estar muy alejada.

Sakamoto et al. (2011) indican que, para mayo, las fuentes de humedad pueden venir del Atlántico Tropical Norte (vía cuenca del Orinoco), Atlántico Tropical Sur (a través de la cuenca amazónica), del Pacífico peruano-chileno (vía Chorro del Chocó), y de la humedad continental del norte de Suramérica (vía cuenca del Orinoco). Hoyos et al. (2017) indican que las fuentes de humedad principales serían: humedad generada sobre el continente en la cuenca del Orinoco y reciclaje local. Estas posibles fuentes de humedad, exceptuando el Pacífico peruano-chileno, implican un alto exceso de deuterio por reciclaje hídrico, el cual no se observa en la Figura 137 b. La fuente Pacífico peruano-chileno por sí sola tampoco explicaría los bajos contenidos isotópicos de las lluvias en mayo y junio, porque esta fuente está poco evolucionada. La firma isotópica para el mes de mayo continúa bajo investigación.

En un año hidrológico normal, los meses de julio y agosto representan un periodo de estiaje en buena parte del país. En esta época del año, la ZCIT está en su posición extrema norte, facilitando el ingreso al país de humedad proveniente del Atlántico Tropical Sur, vía cuenca amazónica. Esa humedad genera sobre Colombia lluvias con una composición isotópica entre las más enriquecidas (enero a marzo) y las más empobrecidas (mayo a junio). El exceso de deuterio tiende a aumentar, en parte, por la presencia de humedad reciclada, principalmente de la cuenca amazónica.

En septiembre, octubre y noviembre, la ZCIT migra hacia el sur, generando la segunda época lluviosa en buena parte del país. En esta época del año, el

Chorro del Chocó está fortalecido trayendo humedad del Pacífico peruano-chileno (Poveda y Mesa, 2000). Especialistas como Hoyos et al. (2017) y Sakamoto et al. (2011) proponen también una segunda fuente de humedad proveniente del noreste de Suramérica, vía cuenca del Orinoco, lo cual está acorde con el incremento observado en el exceso de deuterio.

En diciembre, la ZCIT está alcanzando de nuevo su posición más austral y la firma isotópica de la lluvia tiende a acercarse a la observada en los meses de enero a marzo.

Autores como Poveda et al. (2014) y Hoyos et al. (2017) resaltan el papel que juega la evapotranspiración local en el reciclaje de la precipitación sobre territorio colombiano. Si se toma como referencia el valor del 10 ‰ VSMOW para el exceso de deuterio del promedio de las lluvias en el planeta, se advierte que las medianas en nueve de los doce meses del año están por encima de ese umbral (Figura 137). Solo los meses de mayo (8,7 ‰), junio (8,3 ‰) y julio (8,7 ‰) presentan excesos de deuterio por debajo del 10 ‰. Lo anterior sugiere que el reciclaje hídrico es un componente fundamental en la generación de lluvias sobre Colombia, en sintonía con los hallazgos publicados por los autores arriba mencionados.

Hasta el momento, el análisis se ha centrado en la advección de humedad para explicar las variaciones temporales de la firma isotópica de la lluvia, y por cada mes se han mencionado máximo cuatro fuentes. En realidad, gran parte de las lluvias en Colombia se generan por sistemas convectivos que mezclan humedades que viajan a diferentes altitudes. Por tanto, una imagen más real sobre el origen de las precipitaciones debería incluir más fuentes de humedad. En la actualidad, varios investigadores trabajan en la construcción de modelos conceptuales más complejos que permitan explicar algunas tendencias observadas en la composición isotópica de la lluvia en el trópico que no pueden ser interpretadas con enfoques más sencillos, como el modelo tradicional de destilación Raleigh. Algunos de los nuevos paradigmas buscan explicar la variabilidad isotópica a través de índices que reflejan la relación entre lluvias convectivas y estratiformes (Aggarwal et al., 2016). Se espera que la RNI suministre los insumos básicos para que la comunidad científica profundice en el estudio de la dinámica del régimen de precipitación en Colombia.

La Figura 138 muestra las variaciones mensuales del oxígeno-18 para otras estaciones representativas en Colombia. Al igual que con la Figura 137 a, las precipitaciones mensuales han sido calculadas teniendo en cuenta solo los meses en los que hay disponibles datos isotópicos. El eje de la ordenada en la izquierda se refiere a la concentración isotópica en por miles respecto al patrón VSMOW, mientras que el eje de la ordenada en la derecha representa la lámina mensual de precipitación en mm. Se requiere cautela en la interpretación de los casos en los que solo hay un dato por mes, ya que ese dato puede no representar la tendencia a largo plazo. Las mayores diferencias respecto a la estación Bogotá se observan en los puntos que representan al Caribe y la zona insular. Lamentablemente, por el momento no se tiene una caracterización adecuada de la precipitación en la Amazonía y en la Orinoquía de Colombia.

Finalmente, la Figura 139 presenta la variación temporal del oxígeno-18 para cuatro estaciones, entre junio de 2019 y marzo de 2020. Aunque los promedios mensuales multianuales siguen en la mayoría de las estaciones un patrón similar, es claro que existen diferencias entre puntos de observación. Si se comparan entre sí las series de GNIP-Tulenapa (30 m s. n. m.) y A&A-La Asomadera (4135 m s. n. m.), es evidente que la composición isotópica de la estación cercana a la línea de costa es siempre mayor que la ubicada en la alta montaña. Pero esa diferencia no es tan obvia entre las estaciones CRQ (1550 m s. n. m.) y GNIP-Bogotá (2559 m s. n. m.).

Condiciones propias a escala local y regional imparten singularidades en las firmas isotópicas de la lluvia. La Red Nacional de Isotopía (RNI) ofrece una imagen a escala nacional; pero, si el propósito es responder preguntas hidrogeológicas locales, es necesario diseñar y operar redes con una mayor densidad. Por esa razón, entidades como el Área Metropolitana Valle de Aburrá o Aguas y Aguas de Pereira han implementado sus propias redes isotópicas. En el siguiente numeral, se presentan algunos estudios de caso que ilustran la necesidad de implementación de redes de observación específicas para abordar problemas particulares

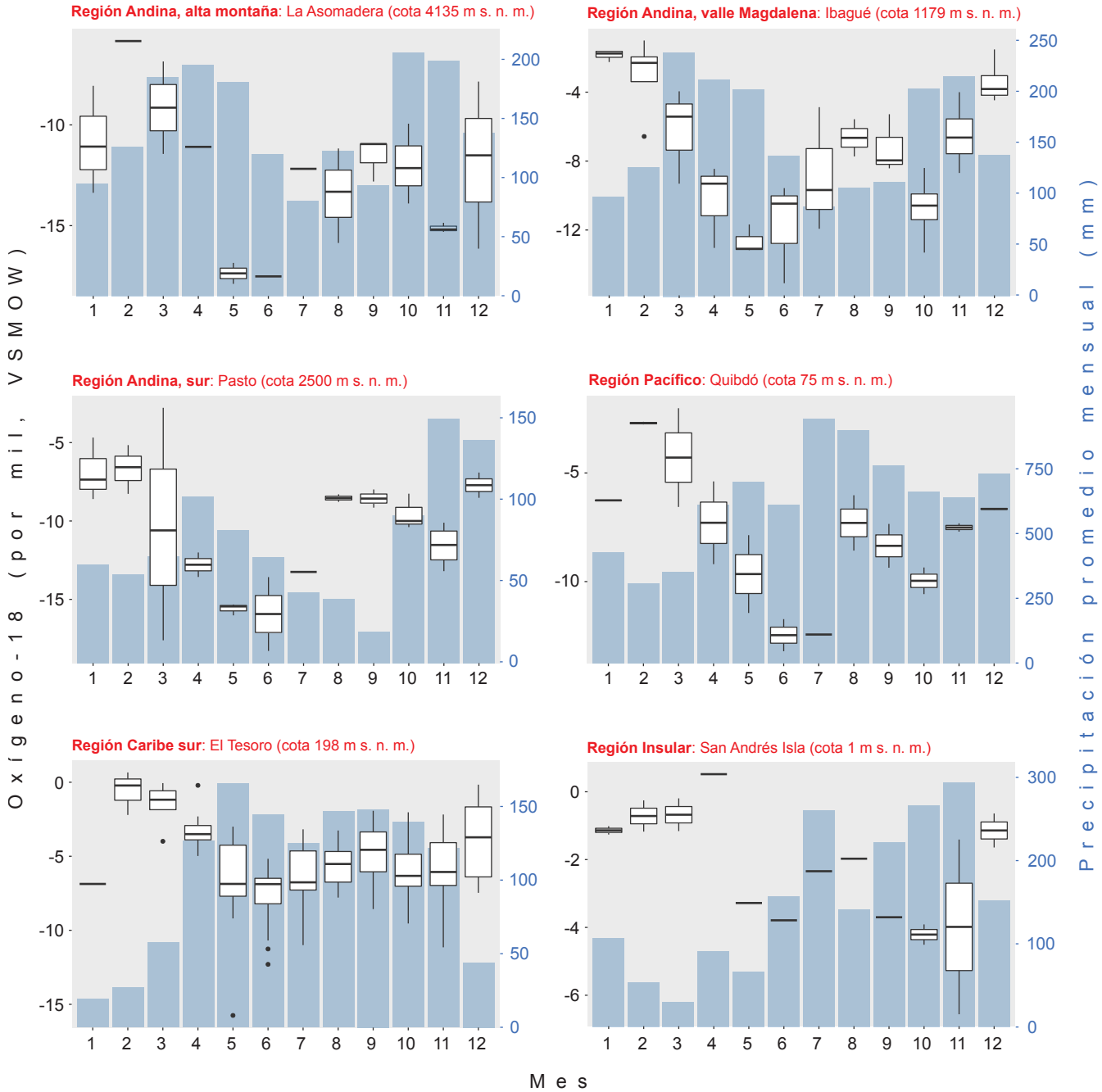



Figura 138. Variación mensual del oxígeno-18 y precipitación, varias estaciones.

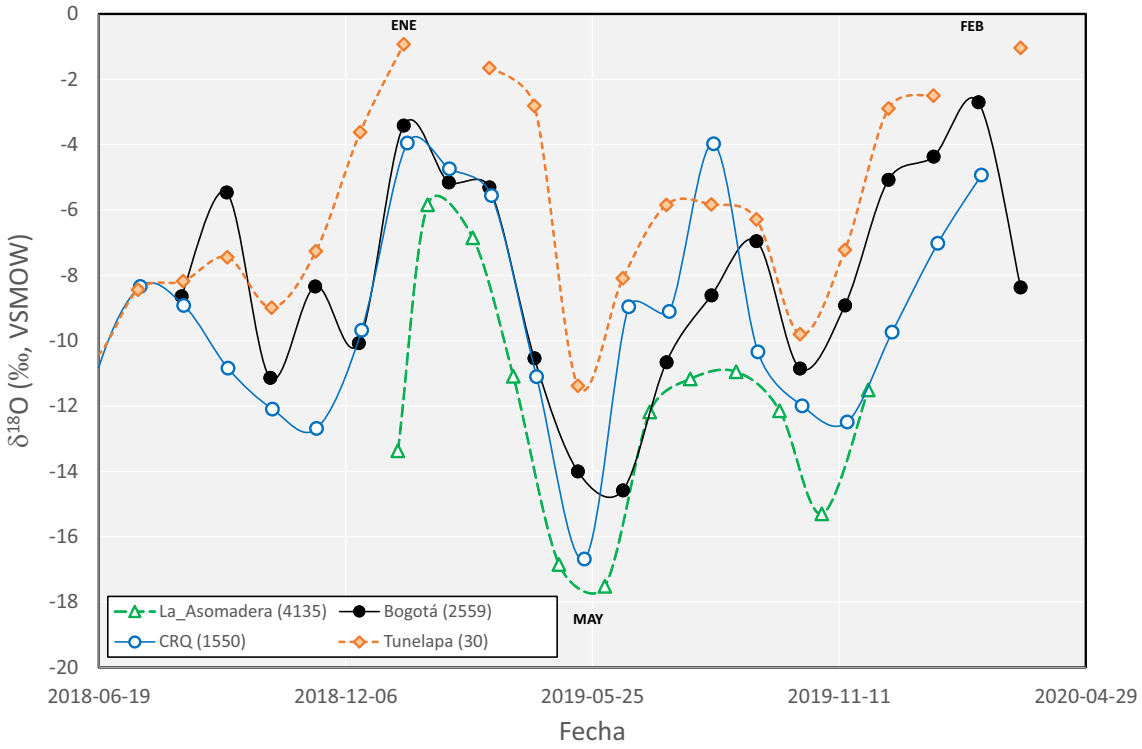



Figura 139. Variación temporal del oxígeno-18 en cuatro estaciones, en el periodo junio de 2019 a marzo de 2020.

## 6.4 Ejemplos de estudios de caso realizados en Colombia

En esta sección se ilustran cinco de las aplicaciones isotópicas más populares en hidrología. Cada una de ellas es mostrada con un estudio de caso realizado en Colombia. Aunque el arsenal de herramientas isotópicas es muy amplio, aquí se abordan solo algunos de los isótopos más empleados: nitrógeno-15 y oxígeno-18 en moléculas de nitratos (contaminación); radiocarbono en el carbono inorgánico disuelto (datación de aguas subterráneas); y deuterio y oxígeno-18 en moléculas de agua (identificación de zonas de recarga de acuíferos, conexión de aguas superficiales y subterráneas, e identificación de mezclas de aguas con diferente origen).

Para cada aplicación se realza la importancia del tema en cuestión, se menciona el papel que juegan las técnicas isotópicas para abordar esa temática, y se dan a conocer algunas contribuciones hechas por investigadores y entidades colombianas respecto al conocimiento de los recursos hídricos en el país mediante la evaluación de los isótopos.

### 6.4.1 Nitrato en el agua subterránea

La contaminación de las aguas subterráneas por nitratos suele ser el resultado del movimiento de nitrógeno hacia la zona no saturada o vadosa, de la ocurrencia de procesos de transformación en las zonas no saturadas o saturadas, y del movimiento de nitratos con las aguas subterráneas (Canter, 1997). La desnitrificación en el agua subterránea se ilustra en la Figura 140.

#### ¿Por qué es importante estudiar la ocurrencia del nitrato en el agua subterránea?

El ciclo del nitrógeno juega un papel fundamental en la productividad orgánica de la hidrósfera. Sin embargo, también es uno de los más influenciables por la actividad humana (Heaton, 1986). Algunas prácticas agrícolas modernas y la disposición inadecuada de aguas residuales domésticas e industriales generan una alta carga de compuestos nitrogenados al ambiente. La presencia de nitrato en el agua en grandes cantidades puede ser tóxica para el ser humano (Ward et al., 2005; y Ako et al., 2014) y para la vida acuática (Jahangir et al., 2012).

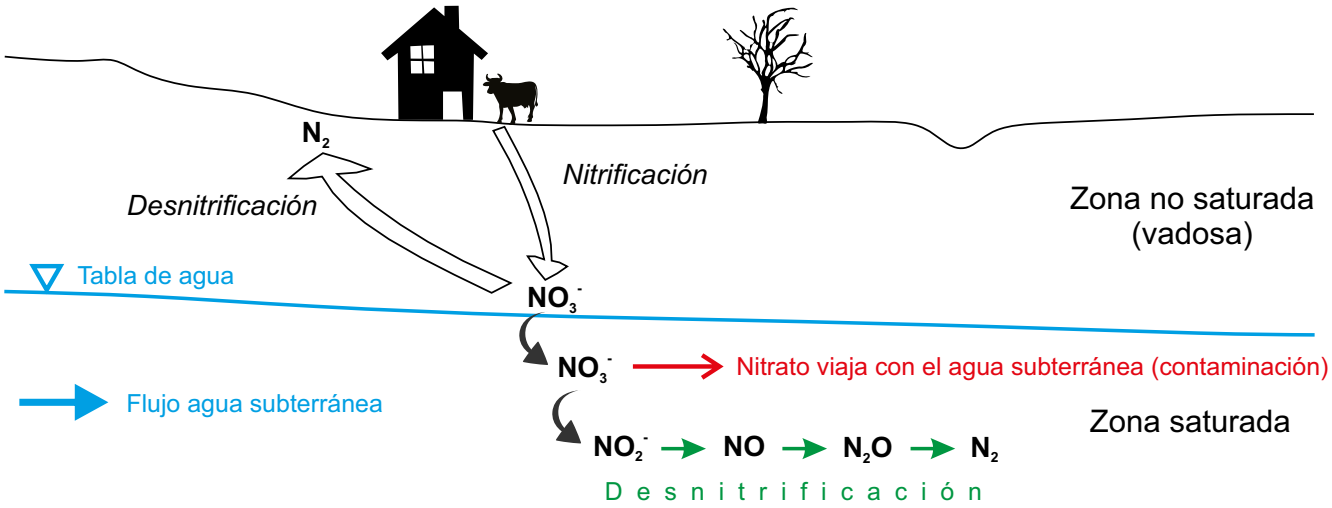



Figura 140. Desnitrificación en el agua subterránea.
Adaptado de Rivett et al. (2008).

Cualquier estrategia encaminada a minimizar el impacto humano en el ciclo del nitrógeno requiere una buena comprensión de las causas que generan los compuestos nitrogenados. También es necesario evaluar la capacidad natural del medio para disminuir las concentraciones de nitrato, sobre todo en las aguas subterráneas.

La desnitrificación es el proceso microbiológico de reducir las moléculas de nitrato ($NO_3$-) y nitrito ($NO_2$-) a formas gaseosas de nitrógeno, principalmente, nitrógeno molecular ($N_2$). Varios tipos de microorganismos tienen la capacidad de desnitrificar (Skiba, 2008). El nitrógeno molecular es un gas incoloro, inodoro e inerte; una vez formado en el subsuelo, tiende a escapar hacia la atmósfera.

## ¿Cómo funcionan los isótopos para evaluar problemas de contaminación con nitratos?

El nitrógeno normal ($^{14}N$) tiene un isótopo pesado ($^{15}N$). En forma análoga, el oxígeno normal ($^{16}O$) tiene dos isótopos pesados ($^{17}O$ y $^{18}O$). La combinación de estos elementos da lugar a varios tipos de moléculas de nitrato, siendo los más abundantes: $^{14}N^{16}O_3$-, $^{15}N^{16}O_3$- y $^{14}N^{18}O^{16}O_2$-. El primero es la molécula liviana de nitrato; los dos últimos son moléculas pesadas de nitrato (Figura 141).

Diferentes fuentes de nitrato pueden dar lugar a nitratos con diversas firmas isotópicas ($^{15}N$ y $^{18}O$); por ejemplo, los fertilizantes fabricados a base de amonio ($NH_4$+) pueden producir nitratos en el agua subterránea cuyo nitrógeno-15 está alrededor de 0 ‰ AIR (AIR: patrón primario con el cual se reporta el nitrógeno-15), mientras que el vertido de las aguas residuales domésticas puede dar lugar a nitratos con nitrógeno-15 en el rango de 5 ‰ a 23 ‰ AIR. La aplicación excesiva de fertilizantes basados en nitrato puede ocasionar grandes cantidades de este elemento en el agua subterránea, con un oxígeno-18 alrededor de 20 ‰ VSMOW. En contraste, el uso de estiércol como abono genera nitrato con un oxígeno-18 en el rango entre -8 ‰ y +10 ‰ VSMOW.

Las bacterias desnitrificadoras tienden a descomponer más moléculas livianas que moléculas pesadas. Como resultado, a medida que la desnitrificación avanza, el nitrato residual (aquel que todavía no ha sido degradado) tiende a enriquecerse en moléculas pesadas. Es decir, a medida que la concentración de nitrato disminuye debido a la desnitrificación, el nitrato residual se enriquece en nitrógeno-15 y oxígeno-18 (Figura 141).

## Ocurrencia de nitrato en el acuífero somero del Abanico del Quindío

En 2019, la Corporación Autónoma Regional del Quindío (CRQ) evaluó la composición isotópica del nitrato en el agua subterránea captada por 36 aljibes y tres manantiales en el acuífero somero, con el

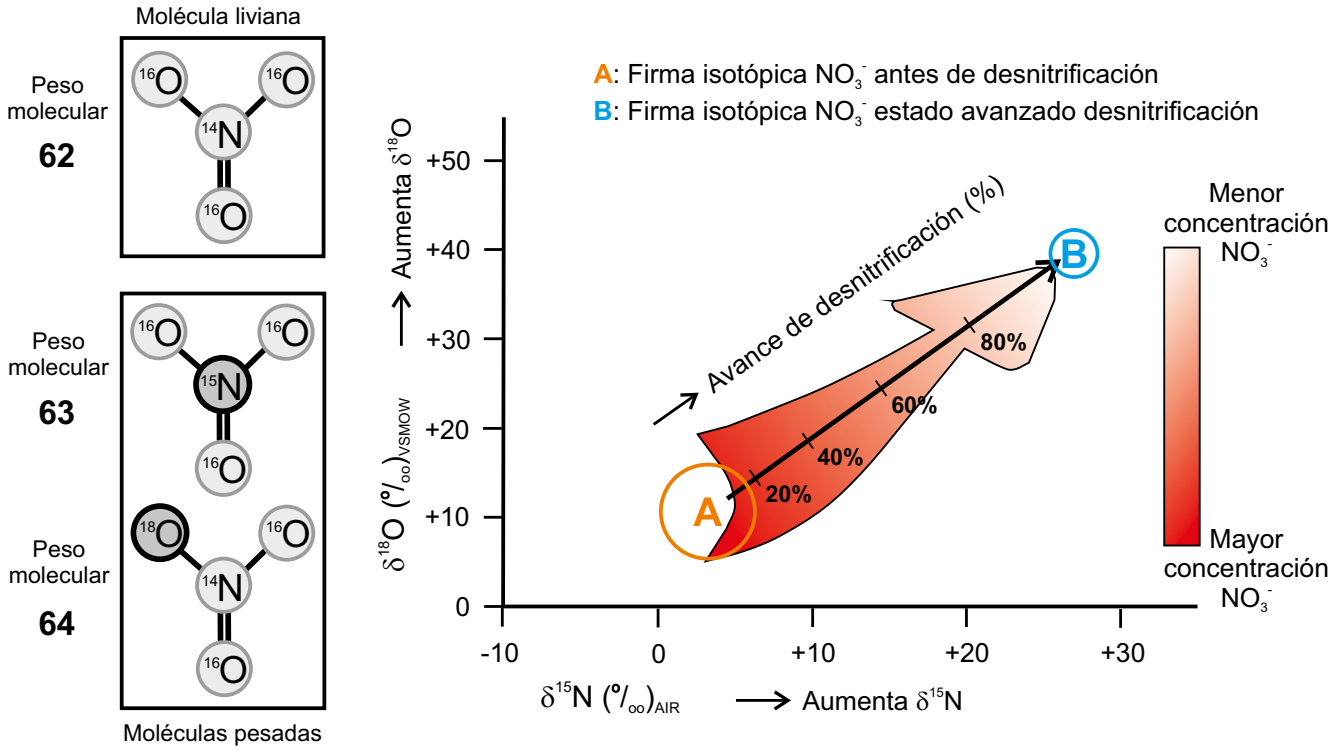



Figura 141. Tipos de molécula de nitrato y evolución isotópica durante la desnitrificación. La posición de A depende de las fuentes de nitrato; la posición de B depende de A y del desarrollo de la desnitrificación.

objetivo de identificar las posibles fuentes de nitrato y determinar si este acuífero, al menos en la zona de la tabla de agua, tiene capacidad de autodepuración.

El acuífero somero del Abanico del Quindío abarca ocho municipios y tiene un espesor promedio de veinte metros. El agua subterránea es extraída por alrededor de un mil cien (1100) aljibes, con profundidades que varían entre 1 metro y 40 metros. Este territorio es utilizado, principalmente, para actividades agropecuarias y de turismo.

La interpolación de datos obtenidos de campañas de muestreo químico realizadas por la CRQ en 2019 (Figura 142) sugiere que solo en el sector noreste del acuífero predomina la concentración de nitrato por debajo de 10 mg $L^{-1}$ (expresado como $NO_3$). Este umbral es tradicionalmente considerado como la concentración máxima de nitrato producida por procesos naturales. Concentraciones por encima de este umbral pueden ser atribuidas a actividades humanas.

Los resultados preliminares de nitrógeno-15 indican que la fuente de nitrato puede ser la disposición inadecuada de aguas residuales domésticas, la aplicación excesiva de fertilizantes orgánicos (estiércol) o ambos (Figura 143). Los primeros resultados sugieren que el acuífero somero (a nivel de tabla de agua) no tiene capacidad de autodepuración (ausencia de procesos de desnitrificación). Nótese en la Figura 143 que las muestras más enriquecidas en nitrógeno-15 y oxígeno-18 no son las que contienen menores concentraciones de nitrato (el tamaño de los círculos es proporcional a la concentración de este ion en el agua subterránea). Si la anterior conclusión es correcta, la concentración de nitrato en el acuífero somero, al menos a nivel de tabla de agua, seguirá aumentando si no se disminuye la carga contaminante. La CRQ está llevando a cabo evaluaciones complementarias para confirmar los hallazgos preliminares y establecer las medidas de manejo adecuadas.

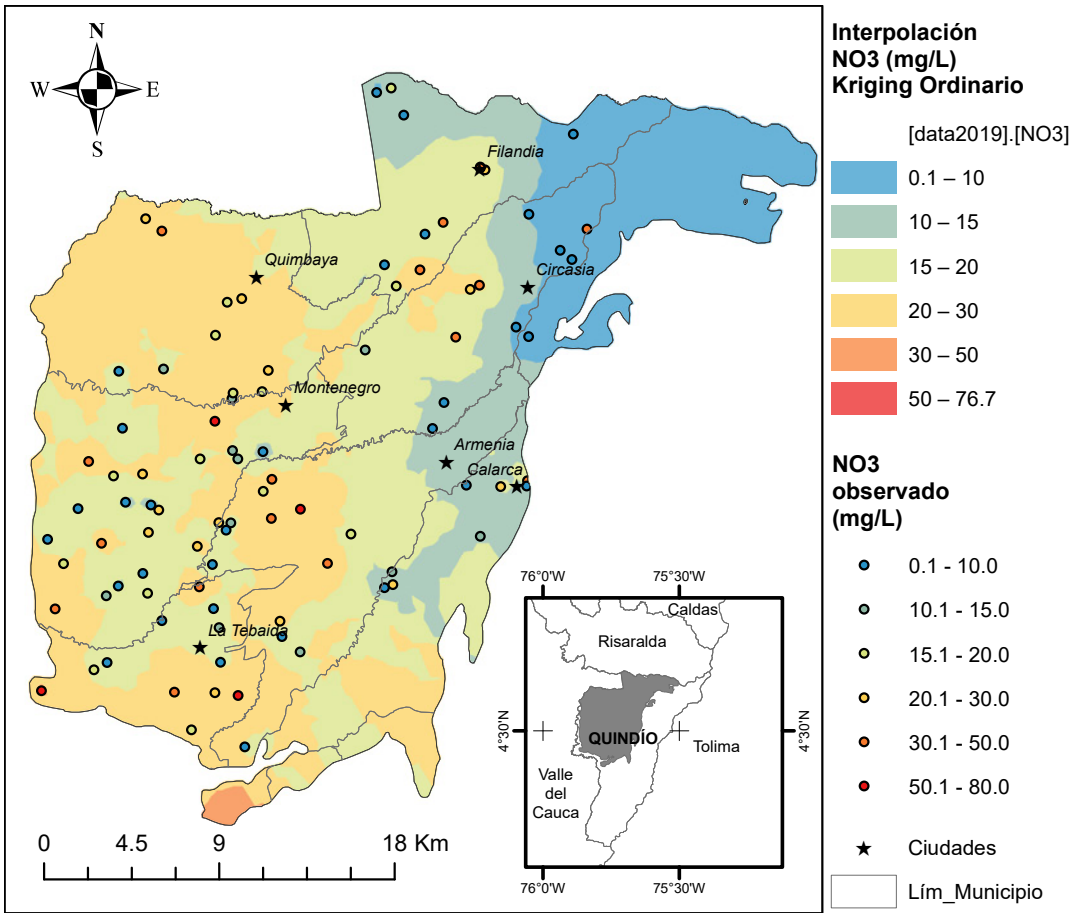



Figura 142. Nitrato en el acuífero somero del Abanico del Quindío. Datos de CRQ. Adaptado de Toro (2019).

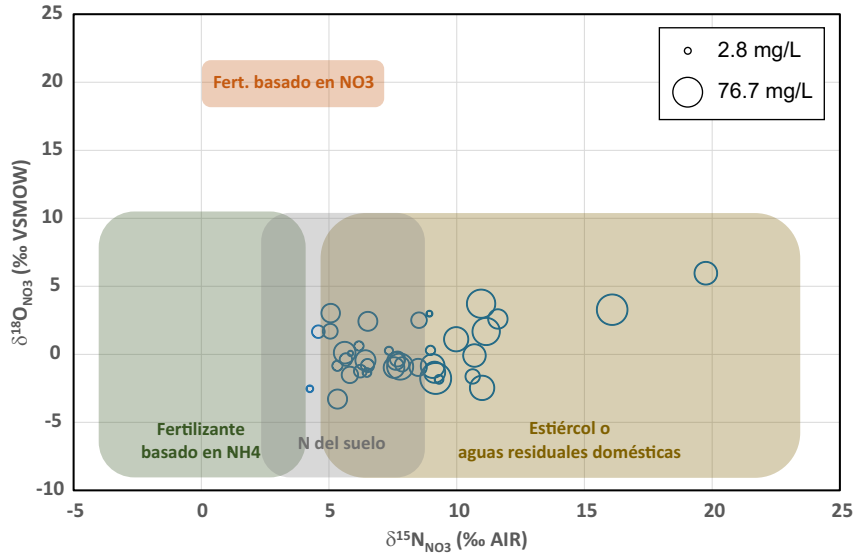



Figura 143. Nitrógeno-15 y oxígeno-18 en nitratos en el agua subterránea (círculos azules). El tamaño de los círculos es directamente proporcional a la concentración de nitrato. Datos de CRQ. Adaptado de Toro (2019).

## 6.4.2 La «edad» del agua subterránea

La «edad» del agua subterránea se define como el tiempo transcurrido desde que el agua entró al acuífero (zona saturada en agua) hasta el momento de la recolección de la muestra en un sitio específico, a una distancia concreta de la zona de recarga.

### ¿Por qué es importante estimar la «edad» del agua subterránea?

El término *edad* aplicado a las aguas subterráneas puede resultar confuso. Muchos investigadores prefieren el término *tiempo medio de residencia del agua subterránea,* debido a que una muestra de agua tomada de un pozo o manantial, por ejemplo, puede estar compuesta de moléculas de agua que han viajado por diferentes caminos y, por tanto, representar diferentes «edades». Otros términos empleados con frecuencia son *edad aparente* y *edad del trazador,* en parte porque una misma muestra datada con varios trazadores puede ser etiquetada con edades distintas. Autores como Bethke y Johnson (2008), y Suckow (2014), discuten sobre el alcance del término «edad» en el agua subterránea. Independientemente de las limitaciones que puedan tener todas las técnicas de datación, estimar la «edad» del agua subterránea es una actividad esencial en casi cualquier estudio hidrogeológico.

El tiempo de residencia del agua en el subsuelo está conectado a dos aspectos fundamentales en el manejo de acuíferos: la renovabilidad del recurso hídrico y la vulnerabilidad a su contaminación. Aguas «recientes» indican que el sistema tiene mecanismos de recarga activos y, por tanto, el agua que se extrae puede ser reemplazada parcial o totalmente por agua que se infiltra en las zonas de recarga. Sin embargo, esta renovabilidad también indica que la calidad del agua subterránea se puede degradar a consecuencia de la disposición inadecuada de contaminantes en las zonas de recarga. En contraposición, las aguas subterráneas «antiguas» ostentan una baja vulnerabilidad intrínseca a la contaminación, pero su aprovechamiento es en esencia una «minería del agua»; es decir, el agua extraída no puede ser reemplazada por procesos naturales. Por lo anterior, es fundamental comprender qué tan dinámicos son los acuíferos que se desean aprovechar y proteger.

### ¿Cómo funcionan los isótopos para estimar la «edad» del agua subterránea?

Existen diversos métodos de datación: los hidráulicos (Ley de Darcy), los químicos (por ejemplo, inyección de colorantes o detección de sustancias creadas por el hombre) y los isotópicos. Respecto a estos últimos, la edad del agua subterránea se puede estimar a través de: (a) decaimiento en el acuífero de radionucleidos que previamente estuvieron en contacto con la atmósfera; (b) acumulación en el subsuelo de isótopos que son productos de desintegraciones radiactivas; y (c) grado de desequilibrio entre los isótopos padre e hijo; por ejemplo, tritio ($^{3}H$) y helio-3 (Davis y Bentley, 1982).

La tasa promedio de desintegración para todos los isótopos radiactivos de uso frecuente en hidrología ya se ha estimado con mucha exactitud. La «vida media» es el tiempo que tarda la actividad de un isótopo radiactivo en caer a la mitad de su valor original (Stock, 2013). La ventana de tiempo de aplicación de un isótopo depende de su vida media: si esta es pequeña (por ejemplo, para el azufre-35 es de solo 87,2 días), su aplicabilidad se enfoca en aguas recientes; si es muy grande (por ejemplo, para el criptón-81 es de 210.000 años), la utilidad se centra en aguas antiguas o paleoaguas (Figura 144).

El tritio ($^{3}H$ o T) y el radiocarbono ($^{14}C$) son los isótopos radiactivos más utilizados para estimar la «edad» del agua subterránea. El primero, con una vida media de 12,32 años, abarca la ventana de tiempo para aguas recientes (entre 0 y, aproximadamente, 70 años); mientras que el segundo, con una vida media de 5730 años, es más adecuado para datar aguas submodernas y antiguas hasta 50.000 años, aunque también pueden dar información sobre aguas recientes.

Independiente de la técnica utilizada, para proponer una «edad» para el agua subterránea se debe: (1) hacer correcciones a la actividad del trazador radiactivo en caso de ser necesario; (2) interpretar los datos en el marco de un modelo de flujo para el acuífero que se desea datar (dos ejemplos de modelos se presentan en la Figura 145); (3) establecer la

«representatividad» de la muestra que se va a datar; y (4) tener en cuenta las incertidumbres analíticas. Textos como Kazemi et al. (2006), IAEA (2013) y Clark (2015) presentan una muy buena descripción de las técnicas de datación empleadas con mayor frecuencia en hidrogeología.

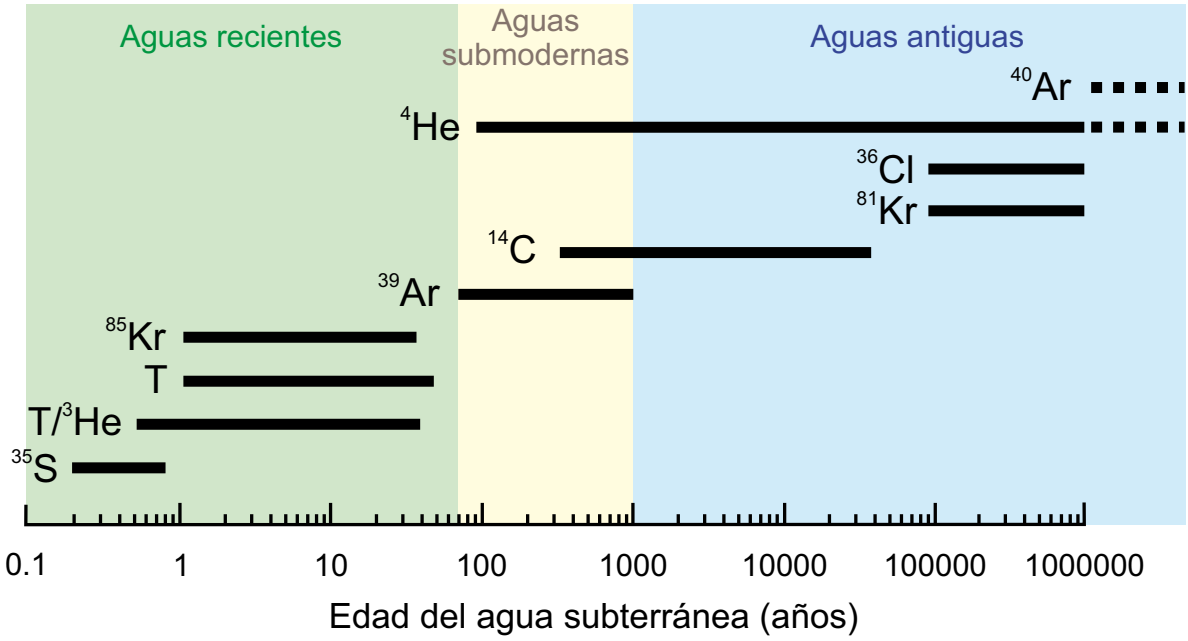



Figura 144. Ventanas de tiempo abarcadas por algunas técnicas isotópicas para estimar el tiempo promedio de residencia del agua subterránea. La *T* se refiere al tritio ($^3$H).

## La edad del agua subterránea del Eje Bananero de Urabá

Con la asistencia del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá (Corpourabá) llevó a cabo una campaña de muestreo entre 2008 y 2012 (proyecto COL8024) en donde se analizaron diversos isótopos, entre ellos tritio y radiocarbono. El objetivo de este proyecto fue entender la dinámica del acuífero T2B del Eje Bananero de Urabá, conformado principalmente por areniscas y conglomerados, depositados en un ambiente continental durante el Terciario. El espesor promedio está alrededor de 200 metros (Villegas, 2016). El acuífero aflora en la margen occidental de la serranía de Abibe (Figura 146), al este de poblaciones como Chigorodó, Carepa y Apartadó; y se inclina y profundiza hacia el oeste.

Para el muestreo, Corpourabá definió varios perfiles siguiendo en forma aproximada líneas de flujo del agua subterránea establecidas con anterioridad a partir de la medición de los niveles de agua de los pozos que captan el acuífero.

En la Figura 146 se muestran cuatro de esas líneas de flujo. En los puntos rojos se detectó actividad de tritio, lo cual significa que el agua captada en esos puntos es reciente; en los puntos amarillos se midió radiocarbono. Claramente se observa que la actividad del radiocarbono disminuye a medida que el punto de observación se aleja de la zona de recarga (números en negrita). Es decir, la edad aparente del agua subterránea aumenta hacia el oeste. Este acuífero está limitado abajo y arriba por materiales con una baja permeabilidad; es confinado hacia el oeste y, desde el punto de vista de su dinámica, se puede considerar como un acuífero con flujo ti-

po pistón (modelo de la izquierda, Figura 145). Las «edades aparentes» mostradas en paréntesis en la Figura 146 corresponden a edades no corregidas para el radiocarbono, pero ofrecen una idea general de los tiempos medios de residencia del agua subterránea en el acuífero T2B.

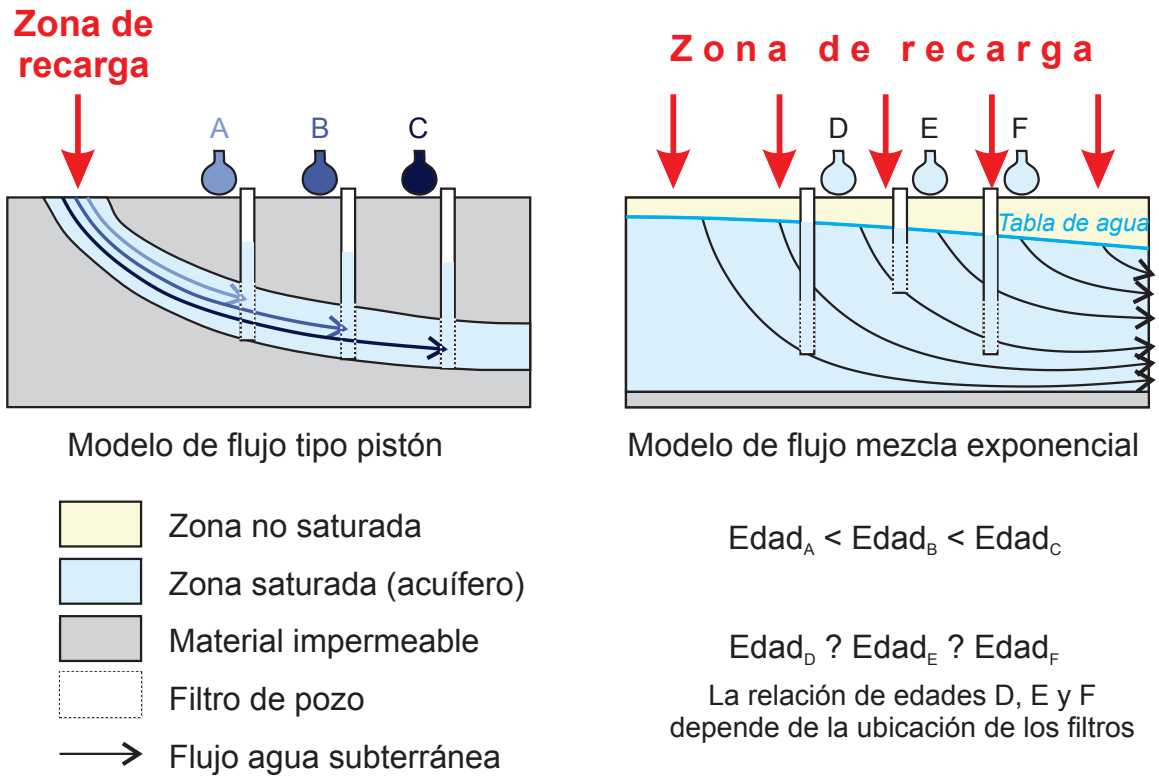



Figura 145. Algunos modelos de flujo utilizados para interpretar los datos suministrados por las técnicas de datación. Las «edades» estimadas también dependen de la forma como se recolectan las muestras de agua.

El agua lluvia, al momento de su infiltración en las zonas de recarga de los acuíferos, conserva la firma isotópica (oxígeno-18 y deuterio) que representa las condiciones climáticas preponderantes del ciclo hidrológico de ese momento. En la Figura 147, se presentan los contenidos de oxígeno-18 de los puntos de muestreo en donde se analizó radiocarbono (líneas de flujo A, B, C y D). Es interesante observar cómo, a medida que las aguas subterráneas se alejan de la zona de recarga (es decir, a medida que las aguas tienen una mayor «edad»), su firma isotópica se distancia más de los valores observados para las aguas recientes (zona gris de la gráfica). En este caso, las aguas más antiguas tienden a ser más negativas en oxígeno-18 que las aguas recientes. Seguramente, estas aguas antiguas indican condiciones climáticas diferentes al momento de su recarga respecto a las condiciones que prevalecen en la actualidad en la región de Urabá. Este estudio aportó a la definición de lineamientos para la protección del agua subterránea en el Eje Bananero del Urabá y constituyó un determinante ambiental para su incorporación en los planes de ordenamiento territorial de los municipios de la zona. Los aspectos más sobresalientes de este proyecto fueron publicados por Villegas et al. (2018).

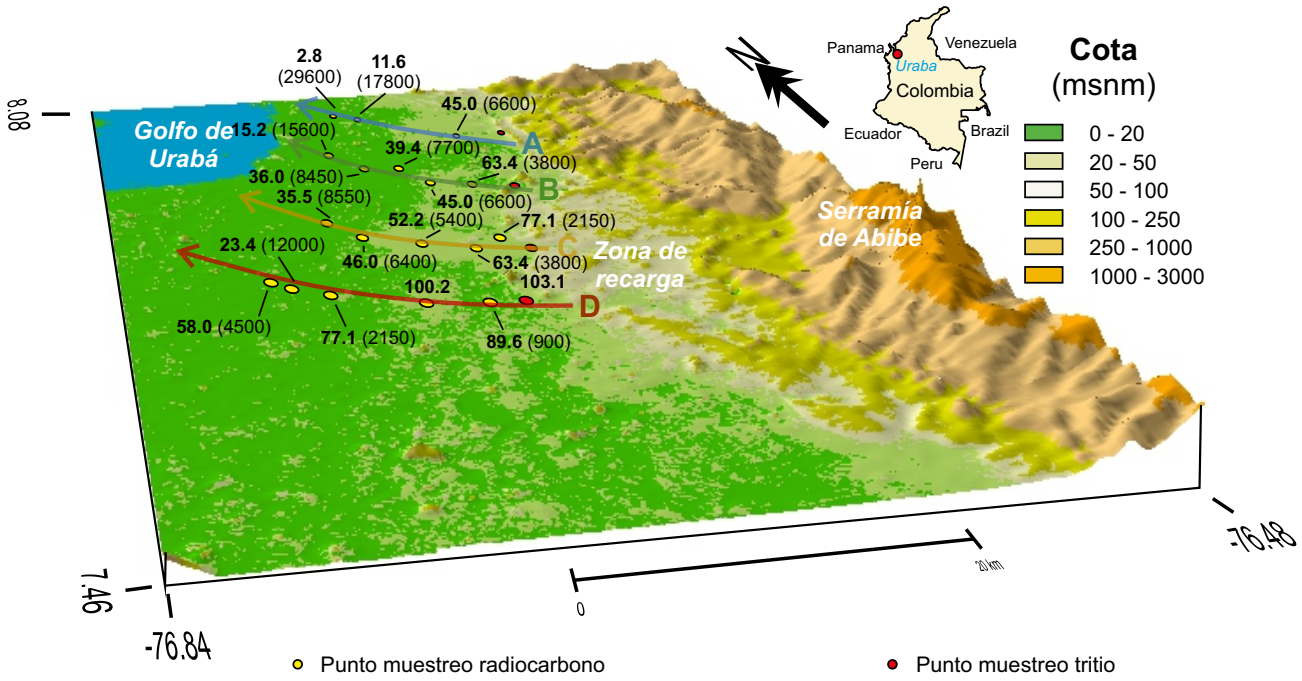



Figura 146. Actividades de radiocarbono. Datos en negrita, en unidades de «porcentaje de carbono moderno» (pcm) y edades no corregidas (datos en paréntesis, en años).

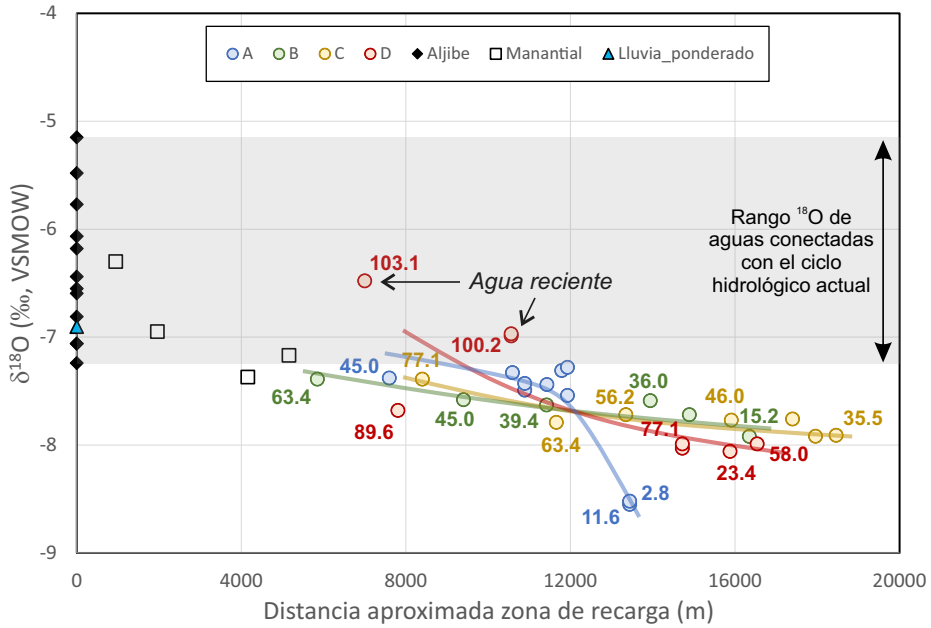



Figura 147. Oxígeno-18 en puntos de observación de radiocarbono, acuífero Formación Corpa (T2B). Datos de Corpourabá.

### 6.4.3 Identificación de zonas de recarga de acuíferos

Uno de los patrones generales más observados en la variación espacial del deuterio y oxígeno-18 en la lluvia se conoce como *efecto altitud.* Este fenómeno indica que las precipitaciones ocurridas en las partes altas tienden a estar más empobrecidas en isótopos pesados que lluvias acontecidas en tierras bajas en la misma región (Dansgaard, 1964).

#### La importancia del gradiente isotópico altitudinal

El gradiente isotópico altitudinal es la tasa de cambio del isótopo pesado (deuterio u oxígeno-18) en la precipitación por unidad de cambio en la altitud. Con frecuencia se observa que ambas variables se correlacionan de manera inversa y lineal: al aumentar la cota, el contenido isotópico de la lluvia disminuye; y viceversa. Este comportamiento se ha estudiado a partir de modelos que asumen «masas aisladas de humedad» y que explican su evolución a medida que se van generando precipitaciones, quedando el vapor de agua remanente cada vez más empobrecido en isótopos pesados.

En general, las tasas de cambio suelen estar en el rango de 0,1 ‰ a 0,5 ‰ para el oxígeno-18 por cada 100 metros de cambio en la altitud (Poage y Chamberlain, 2001). Por su parte, Rozanski y Araguás (1995) encontraron que la tasa de cambio en los Andes es mayor en cotas por encima de 3000 m s. n. m. El *efecto altitud* se observa en forma clara en regiones ampliamente dominadas por una única fuente de humedad. La mezcla de humedades con origen diverso puede dar lugar a una ausencia del gradiente isotópico altitudinal e incluso a una inversión de este (véase, por ejemplo, en Jiao et al., 2019).

La relación empírica entre el contenido isotópico de la lluvia y la altitud ha sido utilizada con éxito para estimar la cota promedio de recarga de los acuíferos. Para ello, es necesario comparar el contenido isotópico del agua subterránea con el de la lluvia. Antes de la comparación, si es necesario, se corrige la firma isotópica del agua subterránea por posibles procesos de evaporación durante la infiltración del agua en la zona de recarga. Una vez las moléculas del agua alcanzan la zona saturada (acuífero), se asume que su contenido isotópico permanece invariable y, por consiguiente, es posible la comparación entre las firmas isotópicas de la lluvia y del agua subterránea.

No sobra decir que, para las autoridades ambientales, es de suma importancia identificar las zonas de recarga de los acuíferos, ya que esta información les permite tomar decisiones apropiadas para evitar o mitigar procesos de contaminación de las aguas subterráneas.

#### ¿Cómo se estima el gradiente isotópico altitudinal?

Para estimar el gradiente isotópico altitudinal, es necesario instalar por lo menos tres colectores de agua lluvia, abarcando el mayor rango altitudinal posible. Es usual distanciar los colectores, mínimo cada 400 metros de altitud. En la Figura 148, se muestra el caso hipotético de cuatro puntos de observación instalados entre los 1000 y los 3000 metros sobre el nivel del mar (m s. n. m). Se deben emplear dispositivos diseñados para minimizar el riesgo de evaporación de la muestra durante el periodo de recolección.

En estudios de hidrogeología es común recolectar muestras compuestas mensuales de agua lluvia durante un periodo de observación de mínimo un año continuo; en caso de ser posible, se prefiere extender el periodo de recolección a varios años. Al final, se calcula el promedio del contenido isotópico por estación. Este promedio es un valor ponderado por cantidad de lluvia; es decir, la concentración isotópica reportada por el laboratorio para cada muestra es multiplicada por la cantidad de precipitación durante su respectivo mes de recolección y dividida por el valor total de la lluvia durante todo el tiempo de muestreo. La suma de los valores así obtenidos da lugar al promedio ponderado por cantidad de lluvia para cada estación. El diagrama de la Figura 148 muestra los cuatro promedios ponderados y la recta de mejor ajuste. La pendiente de la recta es el gradiente estimado. En el ejemplo hipotético, el oxígeno-18 disminuye 0,003 ‰ por cada metro adicional de cota; es decir, la lluvia disminuye 0,3 ‰ en oxígeno-18 por cada 100 metros de aumento en la altitud.

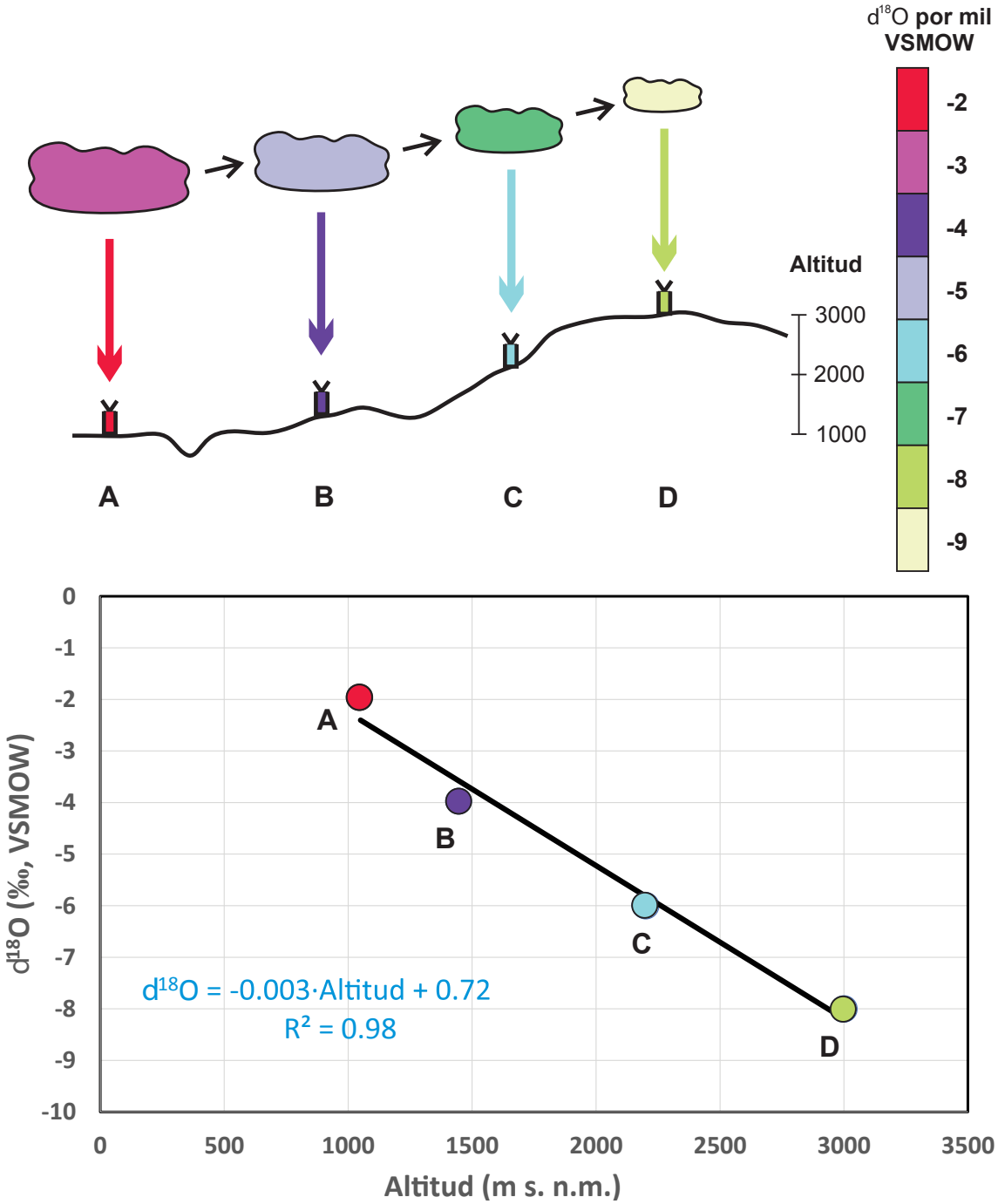



Figura 148. Estimación del gradiente isotópico altitudinal; caso hipotético con cuatro colectores. Datos en el diagrama inferior corresponden a promedios ponderados por cantidad de lluvia.

## El gradiente isotópico altitudinal de la lluvia en el Bajo Cauca antioqueño

Palacio y Betancur (2007) reportan un estudio llevado a cabo en 2005 y 2006 en el Bajo Cauca antioqueño. El objetivo principal de este estudio fue identificar las zonas de recarga para los acuíferos allí presentes; para ello instalaron una red compuesta por ocho colectores de agua lluvia entre las cotas 2470 (SPR-1) y 63 (SPR-8) sobre el nivel medio del mar (Figura 149).

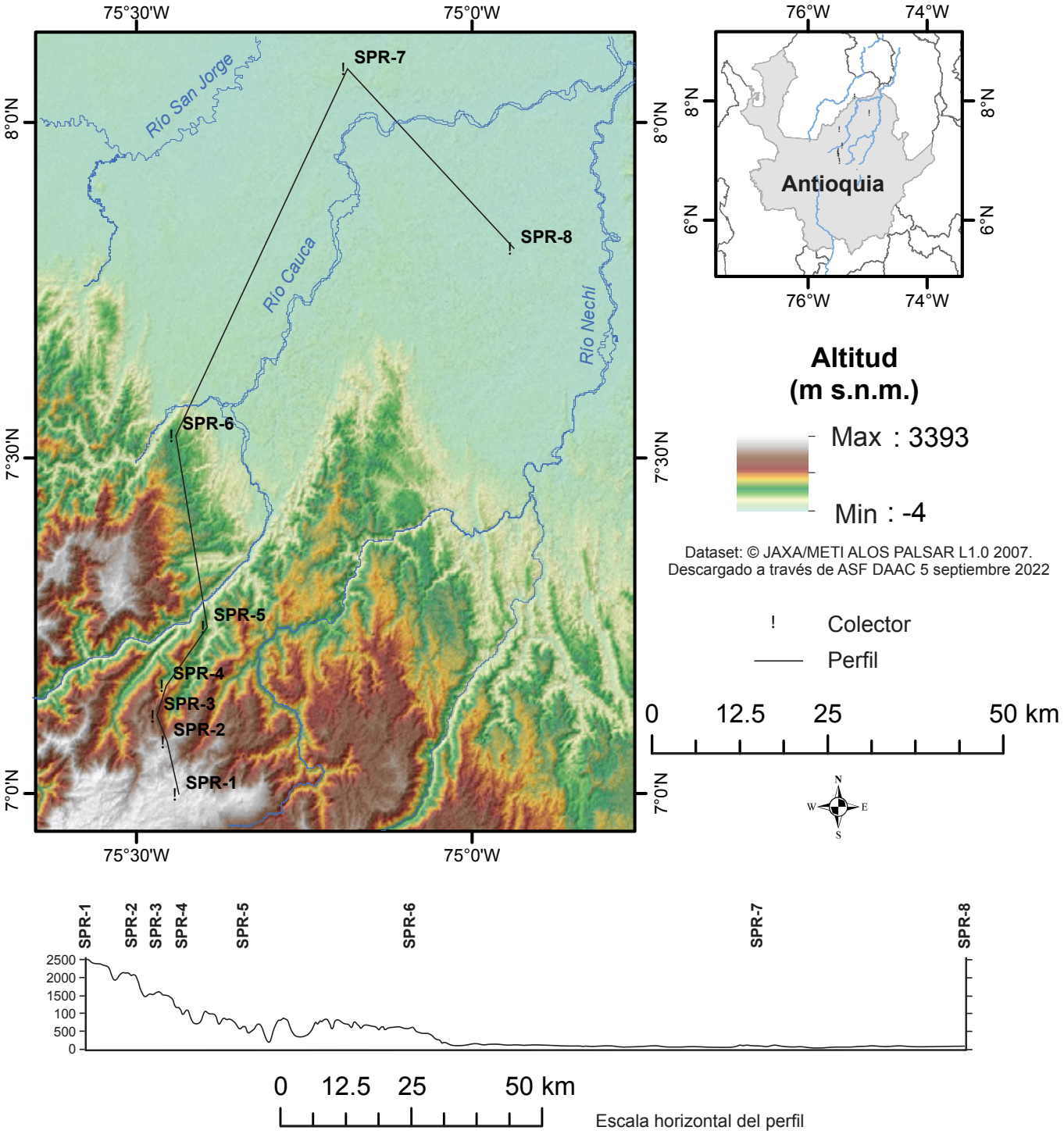



Figura 149. Área de estudio, red instalada por Palacio y Betancur (2007).
Modelo digital de elevación tomado del proyecto ALOS/PALSAR-2.

El muestreo de agua lluvia tuvo lugar entre julio de 2005 y junio de 2006, y se recolectaron muestras compuestas mensuales. Palacio y Betancur (2007) publican los resultados isotópicos de las muestras, pero no los factores de ponderación por cantidad de lluvia. Los promedios ponderados presentados en la Figura 150 se estimaron utilizando los promedios mensuales multianuales de lluvia para el periodo 1981-2010 de estaciones del Ideam cercanas. Lo ideal es ponderar con las cantidades de lluvia registradas durante el periodo de muestreo. Los resultados presentados en la Figura 150 están en concordancia con las conclusiones obtenidas por Palacio y Betancur (2007).

El gradiente estimado es -0,3 ‰ para el oxígeno-18 por cada 100 metros de aumento en la altitud (el estudio original reporta un gradiente de -0,21 ‰ para el oxígeno-18). El rasgo más interesante es el desfase observado entre las lluvias en las zonas alta (estaciones de monitoreo SPR-1 a SPR-4) y baja (SPR-5 a SPR-8). Como lo indican Palacio y Betancur (2007), el régimen de precipitación es diferente entre los dos sectores del área de estudio. El desfase observado puede ser resultado de variaciones en las fuentes de humedad que alimentan ambas regiones.

Según los autores de este estudio, las concentraciones isotópicas obtenidas para la lluvia refuerzan la hipótesis de que el acuífero somero (denominado U123) es recargado con lluvia local. Los datos isotópicos reportados por Palacio y Betancur (2007) han servido como referencia para otras valoraciones hidrogeológicas en el Bajo Cauca antioqueño, en el marco de requerimientos de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (Anla) para empresas mineras que desarrollan actividades de exploración y explotación de minerales preciosos en esta región de Colombia.

### 6.4.4 Conexión entre agua superficial y subterránea

Las interacciones entre aguas subterráneas y superficiales son complejas. Se necesita un marco hidrogeológico robusto para entenderlas en relación con factores climáticos, topográficos, geológicos y biológicos (Sophocleous, 2002). Las técnicas isotópicas son herramientas complementarias muy útiles para entender mejor los factores ambientales que gobiernan las conexiones entre estas dos partes del ciclo hidrológico.

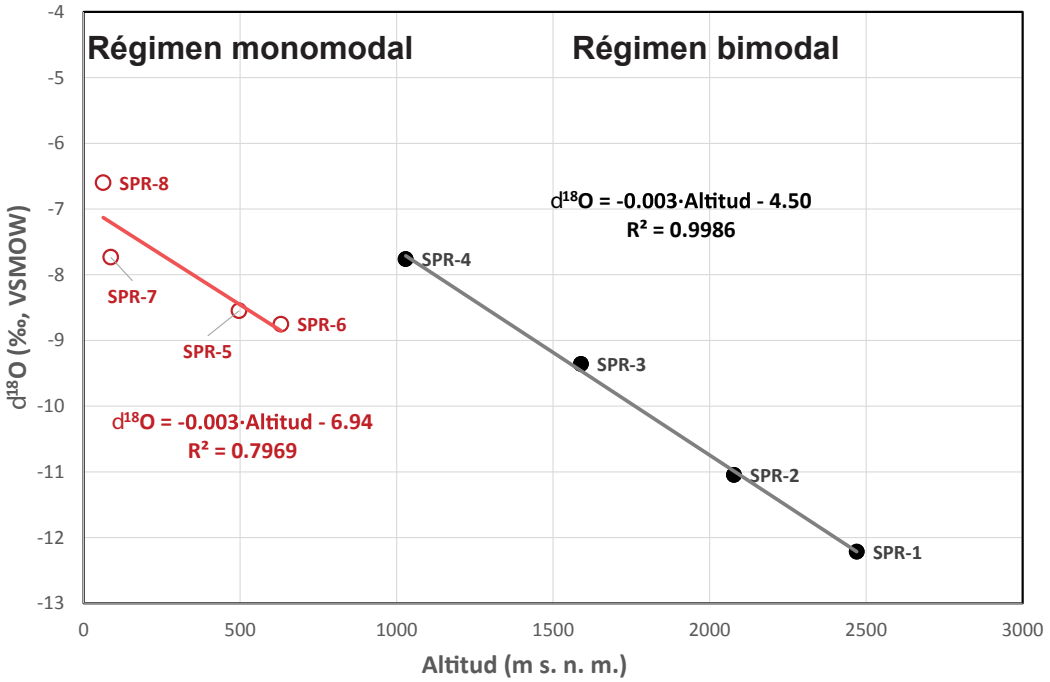



Figura 150. Gradiente isotópico altitudinal estimado para el Bajo Cauca antioqueño. Basado en datos de Palacio y Betancur (2007).

## La importancia de entender la conexión entre aguas superficiales y subterráneas

En la mayoría de las cuencas hidrográficas, las aguas subterráneas y superficiales están conectadas hidráulicamente: los ríos recargan los acuíferos o estos últimos proporcionan un caudal base a los ríos. Humedales y lagos también suelen tener algún vínculo con los acuíferos. Comprender esta conectividad de manera adecuada es fundamental para una gestión eficaz de los recursos hídricos.

El tipo de conexión entre aguas superficiales y subterráneas cambia con frecuencia tanto en el espacio como en el tiempo. Por ejemplo, un río que en la parte alta de una cuenca recarga un acuífero puede, a su vez, ser alimentado por aguas subterráneas en la parte baja de la cuenca. Sin embargo, este patrón puede variar dependiendo del régimen de precipitación (época de estiaje frente a época lluviosa). Por lo anterior, si se desea obtener una imagen completa sobre la dinámica de la cuenca hidrográfica, es necesario hacer una observación sistemática en el tiempo. También es fundamental emplear varias herramientas de investigación, ya que no existe técnica alguna que, por sí sola, pueda dar una imagen completa sobre los recursos hídricos. Los trazadores ambientales, en particular los isótopos, pueden aportar información valiosa sobre las posibles interacciones que existen entre diferentes cuerpos de agua presentes en una cuenca hidrográfica. Como afirman Bertrand et al. (2013), la selección del trazador dependerá del objetivo y de la escala del estudio; por otra parte, Conant et al. (2019) proponen un marco de referencia para evaluar las interacciones entre el agua subterránea y el agua superficial. Existen algunas publicaciones en donde se discuten las ventajas y limitaciones de diferentes técnicas de estudio en este tema, como las de Kendall y McDonnell (1998), Kalbus et al. (2006) y Lewandowski et al. (2020).

## Los isótopos y la relación agua superficial-agua subterránea

El deuterio y el oxígeno-18 en las moléculas del agua pueden ser utilizados en diferentes maneras para obtener información sobre la conectividad de aguas superficiales y subterráneas. Una forma muy popular es a través de la separación de los componentes de hidrogramas. El método tradicional gráfico basado en los volúmenes de agua (Horton, 1933) trata de separar los componentes «rápido» (asociado al evento de lluvia) y «lento» (asociado al flujo base). En contraste, los hidrogramas estimados a partir de la composición isotópica del agua aprovechan el hecho de que, por lo general, el agua subterránea en un mismo punto exhibe una composición isotópica bien definida y más bien constante en el tiempo, mientras que la composición isotópica de los eventos de lluvia varía mucho entre sí. Por ende, las diferencias entre el agua subterránea y la composición isotópica de un evento de lluvia hacen posible la separación de los componentes del hidrograma.

Los hidrogramas construidos a partir de la información isotópica no están exentos de limitaciones. Buttle (1994) enumera cinco supuestos que se deben cumplir para que esta técnica sea válida; de estos, los más difíciles de satisfacer son: (1) la composición isotópica del evento de lluvia debe ser constante en tiempo y espacio o cualquier variación debe ser tenida en cuenta; (2) la contribución de la zona vadosa debe ser despreciable o su firma isotópica debe ser similar a la del agua subterránea (Lewandowski et al., 2020). A pesar de estas debilidades, los hidrogramas isotópicos han sido útiles en muchas evaluaciones. Por ejemplo, Rozanski et al. (2001) muestran un estudio de caso llevado a cabo por Stichler y Hermann (1978) en los Alpes bávaros, en el que se aprecia cómo el oxígeno-18 en el arroyo Lainbach varía en respuesta a dos lluvias torrenciales (Figura 151). En el primer caso (A), el evento torrencial está más enriquecido en oxígeno-18 que el agua preevento. En el caso (B), el evento torrencial ocasiona una disminución temporal de la concentración de oxígeno-18 en el arroyo. Si las firmas isotópicas de las lluvias torrenciales son diferentes respecto a la escorrentía previa al evento, las proporciones de mezcla de los dos componentes se pueden estimar por continuidad hidráulica y balance de masas. Textos como Rozanski et al. (2001) describen en detalle el método de cálculo de las contribuciones de los diferentes componentes del hidrograma.

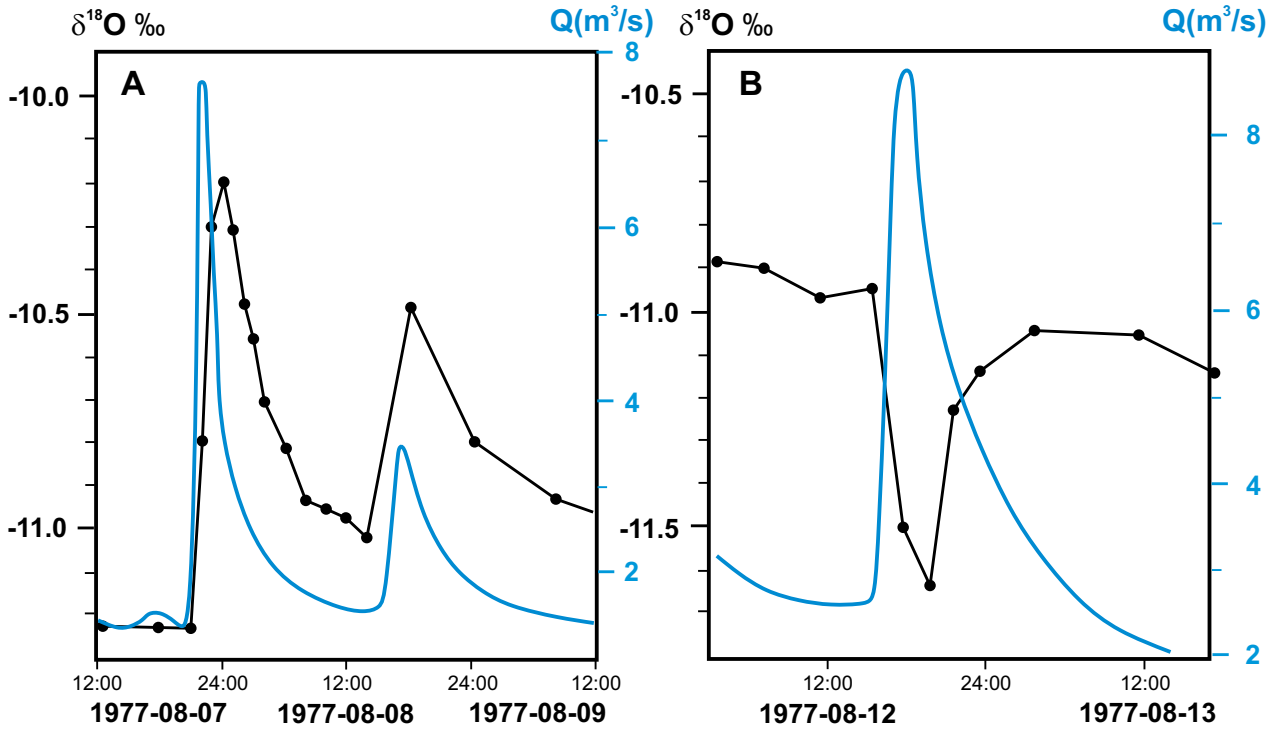



Figura 151. Caudal y contenido isotópico del arroyo Lainbach.
Tomado de Rozanski et al. (2001) después de Stichler y Hermann (1978).

## El aporte del agua subterránea a quebradas en Mutiscua, Norte de Santander

La firma Ev'eaulution, la Universidad de Montpellier y la empresa GSI-LAC llevaron a cabo un estudio de hidrología isotópica en el páramo de Santurbán para la Alianza Biocuenca, conformada por entidades estatales y privadas, y con apoyo de Suiza y Alemania. El muestreo se realizó entre 2016 y 2018 en zona rural del municipio de Mutiscua, Norte de Santander (Figura 152). Uno de los objetivos planteados fue identificar el mecanismo preferente para la generación y sostenimiento de los ríos en esta zona. La Figura 153 presenta parte de los resultados obtenidos en este estudio.

Las curvas P1, P2 y P3 se construyeron a partir de muestras compuestas mensuales de agua lluvia obtenidas en tres colectores localizados a 2570 (P1), 2815 (P2) y 3086 (P3) metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.). La precipitación presenta la tendencia típica de ser más empobrecida (concentración más negativa) a mayores altitudes (P3) y más enriquecida (valores menos negativos) a menores cotas (P1). La lluvia en P2 exhibe una concentración intermedia. Las rectas horizontales a -9,10 ‰ y -8,47 ‰ representan el promedio ponderado por cantidad de lluvia de la composición isotópica para las estaciones P3 y P2, respectivamente.

La curva negra (cuadrados abiertos) representa la composición isotópica de un manantial ubicado a 2815 m s. n. m. La curva roja (cruces) corresponde a la variación del contenido isotópico de una de las tres quebradas evaluadas en este estudio (Valegrá). El comportamiento de las otras dos quebradas es similar y, por tanto, no se muestran en la Figura 153. Nótese que las variaciones temporales en el agua subterránea (manantial) son mínimas, y máximas en la lluvia. En los ríos, la intensidad de la variación temporal ocupa un lugar intermedio. En época de estiaje, el contenido isotópico de la quebrada es relativamente constante y la mayor cantidad de agua que circula por los canales es flujo base (agua proveída por el acuífero). La composición isotópica del flujo base es más negativa que el promedio de la lluvia registrada a 3086 m s. n. m. (P3). Por tal motivo, se estima que la cota promedio de recarga para el flujo base está por encima de la cota 3086.

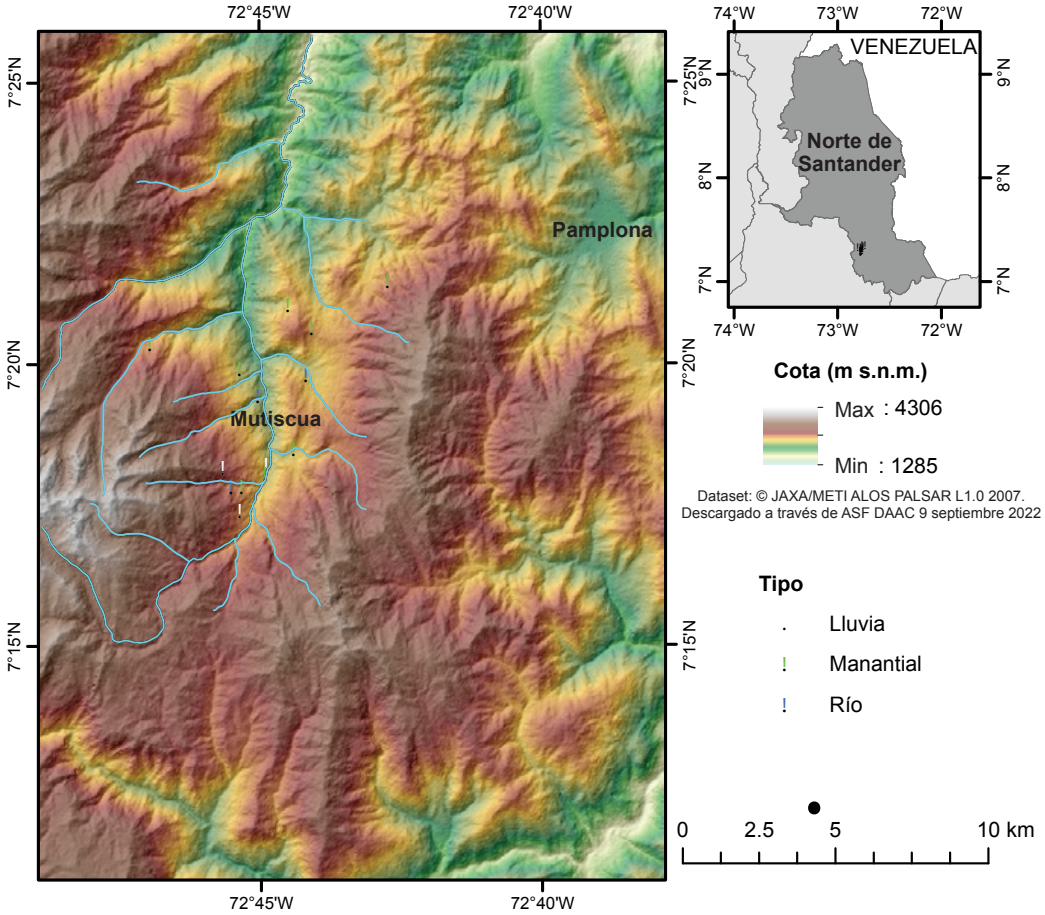



Figura 152. Área de estudio, proyecto Alianza Biocuenca
Modelo digital de elevación tomado del proyecto ALOS/PALSAR-2.

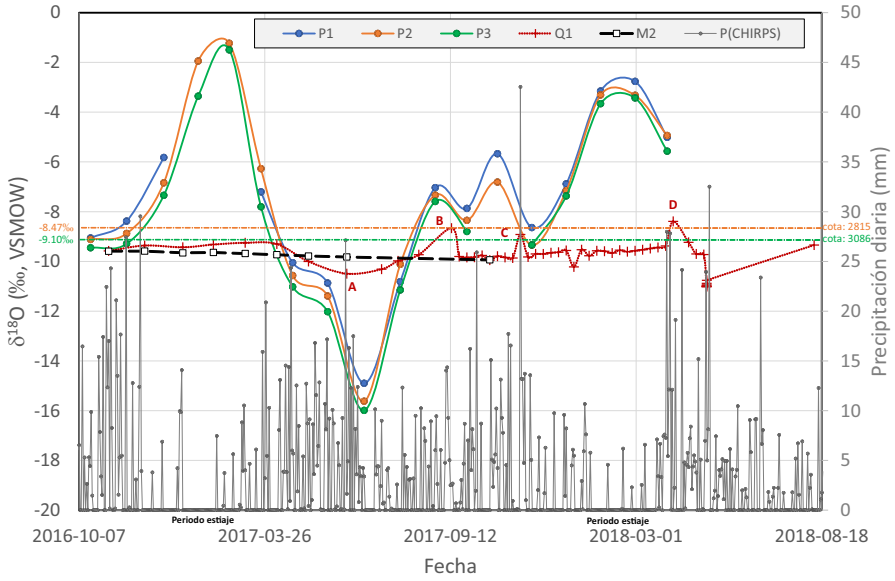



Figura 153. Composición isotópica de la lluvia y quebrada Valegrá (Mutiscua, Norte de Santander).
Datos tomados de Ev'eaulution, et al., (2018).

El contenido isotópico de la quebrada cambia de modo sensible en época de lluvias y el signo del cambio depende de la composición isotópica de la precipitación: si esta es más empobrecida en isótopos pesados que el flujo base, el agua de la quebrada se hará isotópicamente más negativa («A», en la Figura 153); y si es más enriquecida, la quebrada se hará isotópicamente más enriquecida que el flujo base («B», en la Figura 153). Los cambios observados en «C» y «D» claramente corresponden a lluvias torrenciales. En Ev'eaulution et al. (2018) publican los principales resultados del estudio.

Las herramientas isotópicas en hidrología permiten validar otras técnicas hidrogeológicas, evaluar problemas asociados a la calidad del agua, reconocer interconexiones hidráulicas, delimitar zonas de recarga y fuentes de contaminación. El primer paso para combatir los problemas de la calidad del agua es conocer el origen de los contaminantes. Los datos adquiridos por los especialistas en hidrología isotópica ayudan a los responsables de formular políticas en la planificación estratégica y en la gestión de los recursos hídricos. Además, son útiles para determinar el origen y la edad del agua, y el flujo de las aguas subterráneas. Su uso se ha extendido a estudios de variabilidad y cambio climático. Se hace necesario difundir e ilustrar sobre el uso y las bondades de estas técnicas para estudiar y validar los flujos y procesos del ciclo del agua y, de manera particular, su importancia para abordar y validar estudios hidrogeológicos. «El agua subterránea es el componente más desconocido del ciclo del agua. Los científicos emplean isótopos naturales como trazadores para averiguar si hay recarga del agua subterránea, de dónde procede, cómo se desplaza por debajo de la superficie terrestre, y si es vulnerable a la contaminación y a los cambios de las condiciones climáticas» (IAEA, 2019).



Crédito:
Foto por Juan José Montoya Monsalve
- embalse de Topocoro

CAPÍTULO 7

# USOS DEL AGUA EN COLOMBIA

**Autores:**

**CTA/GSI/HH:**
Diego Arévalo Uribe
Consuelo Helena Onofre Encinales
Gabriela Parada Puig
Juan Esteban González Valencia
Carolina María Rodríguez Ortiz
Juan Fernando Figueroa Alzate
Yazari Agudelo Cano

# 7. Usos del agua en Colombia

El capítulo de *Usos del agua en Colombia* —en el marco del Estudio Nacional del Agua 2022— presenta un análisis integrado de los conceptos y las metodologías asociadas a los procesos derivados de la extracción del agua del medio natural con el propósito intencionado de satisfacer una necesidad humana, bien sea de supervivencia o para generar desarrollo económico con base en la producción de un bien o servicio. También se analizan los impactos territoriales asociados con estos fenómenos de uso del agua mediante el uso de indicadores que permiten determinar el nivel de competencia por uso que se genera por las actividades humanas, entre estas mismas y con el medio natural, así como evaluar el nivel de eficiencia en el uso del agua.

Este capítulo mantiene una filosofía coherente con los estudios nacionales del agua que le preceden; presenta resultados generados a partir de datos estadísticos para el año base, que en este caso se consideró el 2020. Estos resultados siempre tienen como origen el análisis detallado de la información oficial disponible, actualizada y con origen verificable, la cual es sometida a un riguroso análisis de homogeneidad y coherencia; de esta manera, se ofrecen resultados que presentan el estado del uso del agua más actualizado disponible y con la menor incertidumbre posible, hecho que favorece una acertada toma de decisión para los territorios en este tema.

## 7.1 Aspectos generales de los usos del agua

Los aspectos generales de los usos del agua presentan las bases conceptuales y metodológicas que permiten el análisis detallado de las actividades relacionadas con los diferentes usos del agua y sus impactos en torno a la presión generada sobre el territorio y la competencia asociada al uso del agua.

Además, se hace un análisis detallado de la evolución del concepto de *demanda hídrica* asociado a los usos del agua en el marco de los estudios nacionales del agua. Esta evolución de la demanda hídrica ha abierto la posibilidad de complementar el concepto mejorando las herramientas de análisis del uso del agua y ha generado impactos que permean el ámbito normativo.

### 7.1.1 Bases generales conceptuales y metodológicas de los usos del agua para ENA 2022

El análisis de los *usos del agua* en el Estudio Nacional del Agua (ENA) 2022 se desarrolla con base en el siguiente marco conceptual y metodológico:

El concepto fundamental del uso del agua es la *demanda hídrica*, que hace referencia al «volumen de agua extraído del sistema natural para suplir los requerimientos de consumo humano, producción sectorial y demandas esenciales de los ecosistemas existentes, sean intervenidos o no» (Ideam, 2010). La *demanda hídrica* incluye el volumen total de agua que es extraído del medio natural, donde una parte del agua entra en un proceso productivo o para el abastecimiento doméstico, transformándose en insumo o materia prima en las cadenas de producción; y otra parte del agua extraída puede ser devuelta a la misma cuenca de donde se obtuvo. La extracción de agua debe considerar tanto las fuentes hídricas superficiales como las subterráneas.

Para complementar el análisis de los *usos del agua*, desde el ENA 2014 (Ideam, 2015) se han incorporado los conceptos asociados a la *huella hídrica*, los cuales ayudan a mejorar la interpretación de los resultados en los análisis desagregados de los usos sectoriales del agua y su impacto territorial.

El análisis de huella hídrica permite analizar el uso del agua desde una definición que parte de la conceptualización de la «apropiación humana de agua», que representa el volumen de agua que no retorna al sistema hídrico de donde fue tomado inicialmente; esto implica un uso del agua mutuamente excluyente con otros usos. El análisis incluye, asimismo, la identificación del origen del agua con base en los conceptos primarios de *agua verde* y *agua azul*, para la estimación de la *huella hídrica verde* y la *huella hídrica azul*.

El *agua verde* hace referencia a los flujos verticales de agua generados en la interfase suelo-vegetación a partir de la lluvia (FAO, 2000). El *agua verde* es agua proveniente de la lluvia que queda almacenada en la humedad del suelo y que es exclusivamente aprovechada por la vegetación; para el caso de uso de agua verde de origen antrópico se habla de «agricultura de secano» que aprovecha la humedad del suelo.

El *agua azul* hace referencia a los flujos horizontales de agua generados en forma de escorrentía en la interfase suelo-vegetación a partir de la lluvia (FAO, 2000). El *agua azul* es agua proveniente de la lluvia que se acumula en ríos, quebradas, lagos y acuíferos. Esta agua es aprovechable para suplir las diferentes necesidades hídricas de las actividades antrópicas en una cuenca, incluyendo el uso para riego en agricultura, abastecimiento humano, y usos industriales y productivos.

La *huella hídrica azul* representa un concepto complementario a la demanda hídrica que hace posible analizar el uso de *agua azul* generada a partir de la extracción de un volumen de agua de ríos, quebradas y acuíferos. La *huella hídrica azul* es la porción de la demanda hídrica que no retorna a la cuenca por una combinación de los tres fenómenos básicos presentes a partir de la extracción del agua: (1) incorporación a un producto, (2) evaporación o (3) trasvase.

Para el sector agrícola, la demanda hídrica es el volumen total de extracción estimado para las necesidades de riego en una zona determinada; la *huella hídrica azul* es la estimación de la porción del riego potencialmente efectivo para sostener la agricultura. Para los otros sectores, representa el volumen de agua no retornado a la cuenca.

La definición clásica de *huella hídrica azul* asociada a uno solo o a la combinación de los tres fenómenos antes nombrados se amplía con un cuarto fenómeno relacionado con los procesos de reúso de agua, los cuales generan un impacto equivalente respecto a la apropiación, pero no necesariamente responden a ninguno de los otros tres fenómenos. El reúso de agua implica que el agua extraída puede no ser retornada a la fuente por estar en un proceso de circularidad que no implica de por sí una incorporación, evaporación o trasvase, pero que deja una porción o la totalidad del volumen de agua extraído para el uso exclusivo de este proceso durante un periodo de tiempo de análisis.

La *huella hídrica verde* es un concepto complementario e independiente de la demanda hídrica, dado que el agua verde no está sometida a extracción para su uso, el cual se da mediante la agricultura y su relación con el suelo, pero no hace parte de la demanda hídrica. *La huella hídrica verde* representa la apropiación humana del *agua verde* por la actividad agrícola, que es la única actividad que permite un aprovechamiento y apropiación humana del agua de la lluvia que queda almacenada en la humedad del suelo y que sostiene la mayor parte de agricultura de secano en Colombia. Para el sector pecuario, se estima el volumen del agua verde consumida por las zonas de pastoreo, contabilizando solamente la parte que tiene como propósito la transformación en carne y leche.

Existen conceptos adicionales como los *flujos de retorno*, que representan el volumen de agua que no es cuantificado en la *huella hídrica azul* y, por lo tanto, no es apropiado por una actividad humana, y genera un retorno a la cuenca como excedente de las actividades económicas y el consumo humano. Para los flujos de retorno se considera el impacto asociado al momento y al lugar de retorno que implica un uso de agua total o parcialmente excluyente con otros usos del agua, en un determinado territorio y periodo de tiempo.

Como caso especial, la demanda hídrica del sector hidroenergético incluye el agua que permanece retenida por un periodo de tiempo que condiciona la disponibilidad de agua para otros usuarios o sectores (riego agrícola, usos pecuarios, consumo doméstico, etc.). Las descargas por agua turbinada, los vertimientos sectoriales o las pérdidas por procesos (agua extraída y retornada) se consideran parte de los *flujos de retorno* (Ideam, 2015).

El proceso metodológico se ha mantenido; el detalle de la metodología de cálculo se recoge en

el Estudio Nacional del Agua 2010 (Ideam, 2010). Cambios significativos para esta versión del ENA se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Los valores de uso de agua sectorial se continúan ajustando y mejorando de acuerdo con la existencia y calidad de la información base reportada y disponible. Debido al uso de nuevas fuentes de información, se pueden evidenciar algunos cambios significativos de volúmenes de uso de agua frente al análisis tendencial esperado; esto se explica por las nuevas fuentes de información que suministran directamente los usuarios de agua que —aunque cuentan con mayor detalle y ofrecen mejores resultados— en algunos casos continúan siendo parciales.

- Se presentan cambios en el alcance geográfico de recolección y variaciones en los criterios de análisis y reporte de información estadística oficial para algunos sectores. Para el sector agrícola, la información estadística agropecuaria pasó del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) a la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA), y esto ha generado nuevos análisis y resultados. Para otros sectores, como el de hidrocarburos, el pecuario y el piscícola o el de las industrias, se tuvo información más detallada obtenida de bases oficiales como el RUA y el SIRH, y suministrada directamente por los principales usuarios del agua por sector, como ocurre con Ecopetrol. En todos los casos se ha trabajado con la información disponible actualizada y oficial y se ha analizado e interpretado con relación a los ENA de años anteriores.

- Para el Estudio Nacional de Agua 2022 se analizó de forma detallada la información del año base 2020 con respecto al año 2019, y en relación con los análisis de años previos suministrados en los ENA anteriores, con el propósito de identificar comportamientos atípicos relacionados con la cuarentena global de la pandemia del COVID-19. La conclusión es que se encontraron algunos comportamientos atípicos que son explicados por la situación especial; sin embargo, este comportamiento no invalida el análisis de este año como año de análisis para el Estudio.

### 7.1.2 Evolución de los conceptos asociados a los usos del agua y sus implicaciones

El concepto principal asociado al análisis del uso del agua es la demanda hídrica. Este concepto ha evolucionado a través de los diferentes estudios nacionales del agua; parte de una definición básica asociada a las necesidades hídricas de las actividades hasta alcanzar en la actualidad una definición muy detallada que incorpora conceptos complementarios que explican la totalidad de los fenómenos asociados a los usos del agua; diferencia los impactos por propósito de uso en cada territorio (subzona hidrográfica) y por origen del agua (agua verde y agua azul). Los hitos principales de la evolución conceptual son:

- Primer Estudio Nacional del Agua (Fonade, 1985): donde el concepto de demanda hídrica está atado al concepto de consumo; estuvo vinculado estrictamente a las proyecciones de consumos sectoriales de cuatro sectores (consumo humano, industrial, agricultura y energía).

- Estudios nacionales del agua 1998, 2000, 2004 (Ideam): en los que el concepto de demanda hídrica está vinculado al uso de agua; plantean estimaciones sectoriales que incorporan mayor número de sectores usuarios del agua (doméstico, pecuario, agrícola, energético, industrial, servicios). Los citados estudios aplicaron el resultado estimado de demanda hídrica para su análisis de presión por uso de agua mediante el índice de escasez[1].

- A partir del Estudio Nacional del Agua (ENA) 2010 (Ideam, 2010), se define la demanda hídrica como la extracción de agua del sistema natural destinada a suplir las necesidades o requerimientos del consumo humano, la producción sectorial y las demandas esenciales de los ecosistemas no antrópicos.

[1] El *índice de escasez* es un indicador de presión sobre el uso del agua que se obtiene mediante la relación entre la demanda hídrica y la oferta hídrica disponible. La definición de *demanda hídrica* como uso de agua, incluida en la Resolución 0865/2004, es adoptada en la metodología del cálculo del *índice de escasez* para el cálculo de la *tasa de uso de agua* (TUA). La definición incluida en la citada resolución es: «la demanda hídrica es el volumen de agua usada para el desarrollo de actividades socioeconómicas».

- El ENA 2010 (Ideam, 2010) consolida la batería de indicadores de estado, presión y riesgo del recurso hídrico, y se hace la modificación nominal del *índice de escasez* al *índice de uso de agua* (IUA), el cual mantiene la misma formulación matemática y conserva el objetivo relativo de mostrar la relación entre la demanda hídrica (extracción total de agua) y la oferta hídrica disponible (oferta total menos caudal ambiental[2]).

- La definición actual de demanda hídrica ayuda a identificar de manera precisa las actividades que generan una extracción de agua del medio natural, entendiendo que el impacto territorial se genera desde el momento de la extracción de la fuente; por lo tanto, es el volumen de agua total extraído el que debe informar sobre la presión por uso al que está sometido un territorio.

- La definición de demanda hídrica abre la posibilidad de usar conceptos adicionales que permiten obtener información específica y complementaria de los usos que generan exclusión frente a otros usos por apropiación humana de agua y sus implicaciones; para ello, desde ENA 2014 se ha incorporado el concepto de *huella hídrica* y sus bases conceptuales (agua verde y agua azul) que han permitido un mayor entendimiento y precisión en los análisis de usos sectoriales.

## 7.2 Uso del agua sectorial y multisectorial

El análisis de los usos del agua se basa en la aplicación de conceptos y metodologías que constituyen las herramientas técnicas para entender, interpretar y cuantificar el impacto de las actividades que usan el agua para su desarrollo; esto segmenta el análisis por grupo de actividades con un propósito común, llevando a un análisis individual por cada sector usuario de agua. Este análisis sectorial hace posible consolidar la sumatoria de los resultados de uso de agua de los sectores en un mismo periodo de tiempo y en un territorio común y permite el análisis multisectorial a nivel de territorio, el cual puede ser nacional o regional, contando con una mirada político-administrativa (departamentos) o bajo una mirada hidrológica (área, zona y subzonas hidrográficas).

### 7.2.1 Evolución de los usos del agua en Colombia

Se presenta en este apartado la cuantificación estimada de la *demanda hídrica* y de la *huella hídrica* azul para el año 2020 (año base de análisis para ENA 2022); adicionalmente, se analiza el comportamiento tendencial de estas variables con los valores ajustados según los parámetros de información disponibles para el ENA 2022 para los años 2008, 2012 y 2016 (años base de análisis para ENA 2010, ENA 2014 y ENA 2018, respectivamente).

Como se puede ver en la Figura 154, la demanda hídrica multisectorial nacional para el año 2020 se estima en 32.331,9 millones de $m^3$ y la huella hídrica azul para el mismo año se estima en 8837,7 millones de $m^3$, valor que representa un 27,3 % de la demanda hídrica para ese año. La demanda hídrica presenta una disminución del 9 % en comparación con el valor estimado[3] para el año 2016, la huella hídrica azul presenta también una disminución de 17 % con respecto al valor estimado en el último Estudio Nacional del Agua.

Hay varios factores que inciden en la reducción de la demanda hídrica y la huella hídrica azul; se identifican dos orígenes fundamentales que explican los cambios reportados: (1) cambios que responden a una situación coyuntural del año de análisis, como lo es el comportamiento del clima, la distribución temporal y geográfica de la lluvia, o la situación asociada con la pandemia y el confinamiento global que incidió en los comportamientos de la población y, por tanto, en los usos del agua; (2) cambios en la metodología de recopilación, análisis y consolidación de las fuentes de información disponibles que afectan los resultados.

Con respecto a situaciones propias del año de análisis (comportamiento del clima y pandemia),

[2] El *caudal ambiental* es el volumen de agua necesario en términos de cantidad, calidad, duración y estacionalidad para el sostenimiento de los ecosistemas acuáticos y para el desarrollo de actividades socioeconómicas de los usuarios aguas abajo de la fuente de la cual dependen tales ecosistemas (Minambiente, 2010).

[3] El dato de demanda hídrica total multisectorial publicado en el ENA 2018 (Ideam, 2019) fue de 37.308 millones de $m^3$/año. Este valor fue corregido en el ENA 2022 con base en nueva información disponible y mejoras metodológicas en cálculos de demanda sectorial, lo que permitió recalcular los datos de demanda hídrica total multisectorial para ENA 2018 (Ideam, 2019), ENA 2014 (Ideam, 2015) y ENA 2010 (Ideam, 2010), generando la posibilidad de una comparación de valores con base en información homogénea.

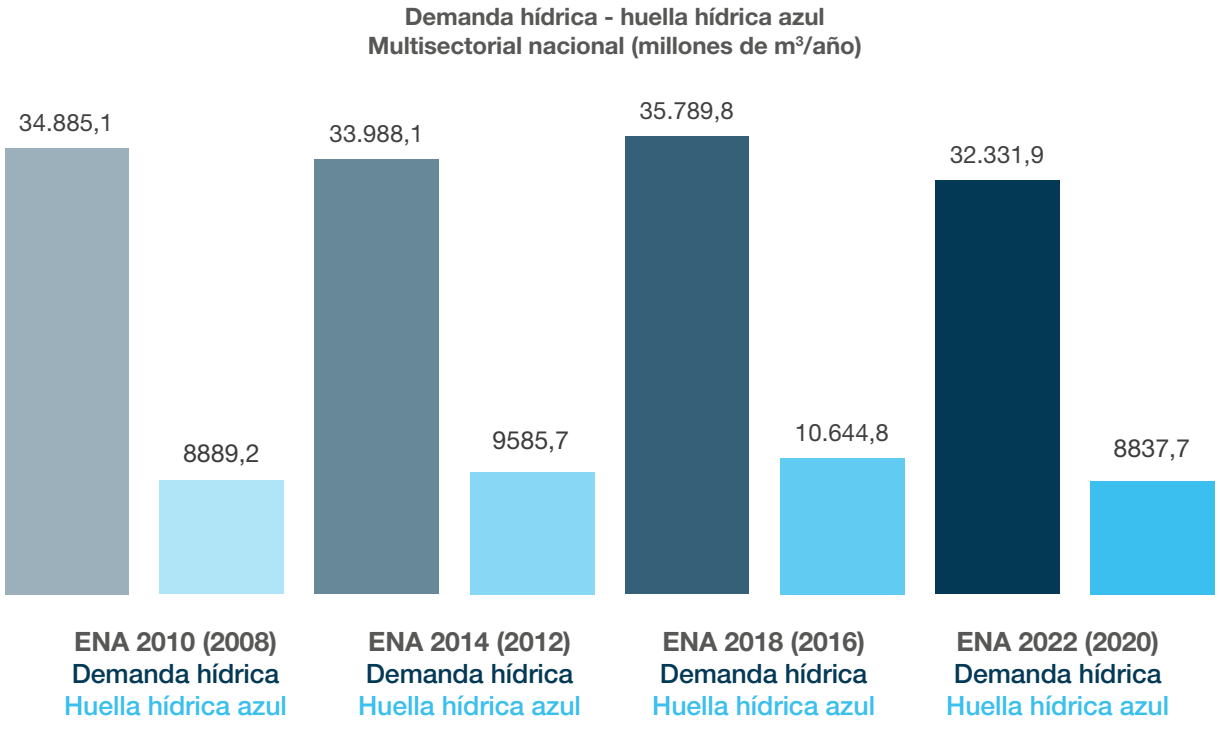



Figura 154. Uso del agua azul multisectorial 2008-2020 (demanda hídrica y huella hídrica azul).

los cambios se identificaron y analizaron, y el resultado se reporta como resultado válido para ENA 2022. Para la situación en la cual los cambios están originados en información de base que presenta modificaciones conceptuales, metodológicas o de procedimiento, se identificaron y analizaron; y cuando los cambios permitieron tener acceso a nueva información de años anteriores, se validó la cuantificación para ENA 2022 y se realizó un ajuste a los valores reportados en estudios nacionales del agua anteriores. De esta forma, la comparación de comportamiento y análisis de tendencias realizado en el ENA 2022 cuenta con parámetros de información homogénea, manteniendo la mejor información disponible para toda la serie. Se exponen a continuación los ejemplos específicos que explican los cambios mencionados:

- Cambio en el manejo y análisis de la estadística de pastos agrícolas y pecuarios, donde la información del sector —que fue manejada por la plataforma Agronet del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR)— pasó a ser administrada desde 2019 por la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA). Este cambio evidencia una modificación sensible en la interpretación de áreas de pastoreo y de áreas de pastos de corte y forrajes que ha generado una diferencia en requerimiento potencial de riego, lo que afecta directamente la demanda hídrica y la huella hídrica azul.

- Existe un comportamiento de demanda hídrica moderada en varios sectores (industria, servicios, construcción), en donde se identifica una reducción importante en el año 2020 que se explica por la pandemia del COVID-19.

- La participación principal en la demanda hídrica total multisectorial está dada por el sector agrícola; allí el requerimiento de riego potencial es dependiente no solo del aumento en las áreas sembradas, sino del comportamiento del clima a nivel regional y con su distribución temporal. En este sentido, se identificó una reducción en la demanda hídrica agrícola de cultivos transitorios que está asociada a la variación interanual y regional de la precipitación.

Por otra parte, se presenta la cuantificación estimada de la huella hídrica verde para el año 2020 (año base de análisis para el ENA 2022) y, adicionalmente, se analiza su comportamiento tendencial con los valores publicados[4] para los años 2008, 2012 y 2016 (años base de análisis para los ENA 2010, ENA 2014 y ENA 2018, respectivamente).

En la Figura 155 se presenta el comportamiento de la huella hídrica verde para los años 2008, 2012, 2016 y 2020.

La huella hídrica verde agrícola (cultivos permanentes y transitorios) para el año 2020 se estima en 50.146,2 millones de $m^3$, valor que representa una disminución de 3 % con respecto a la huella hídrica verde agrícola del año 2016. La huella hídrica verde pecuaria (pastos de corte, forraje y áreas de ganadería extensiva para pastoreo) para el 2020 se estima en 260.503,8 millones de $m^3$, valor que representa un aumento de 27 % con respecto a la huella hídrica verde pecuaria del año 2016.

El principal factor que explica el cambio significativo en la estimación de la huella hídrica verde pecuaria (pastos de corte, forraje y áreas de ganadería extensiva para pastoreo) es el cambio en el manejo de la estadística de pastos, donde la información que era manejada por la plataforma Agronet, gestionada desde el MADR, pasó a ser manejada desde 2019 por la UPRA. Esta variación en la metodología de análisis, interpretación y ajuste de la información de áreas de pastoreo, y de áreas de pastos de corte y forrajes implica una variación de áreas; por tanto, hay un cambio en la estimación de requerimiento hídrico que sigue con la premisa general del Estudio Nacional del Agua sobre garantizar el uso de la más actualizada y detallada información oficial disponible para el sector a nivel nacional.

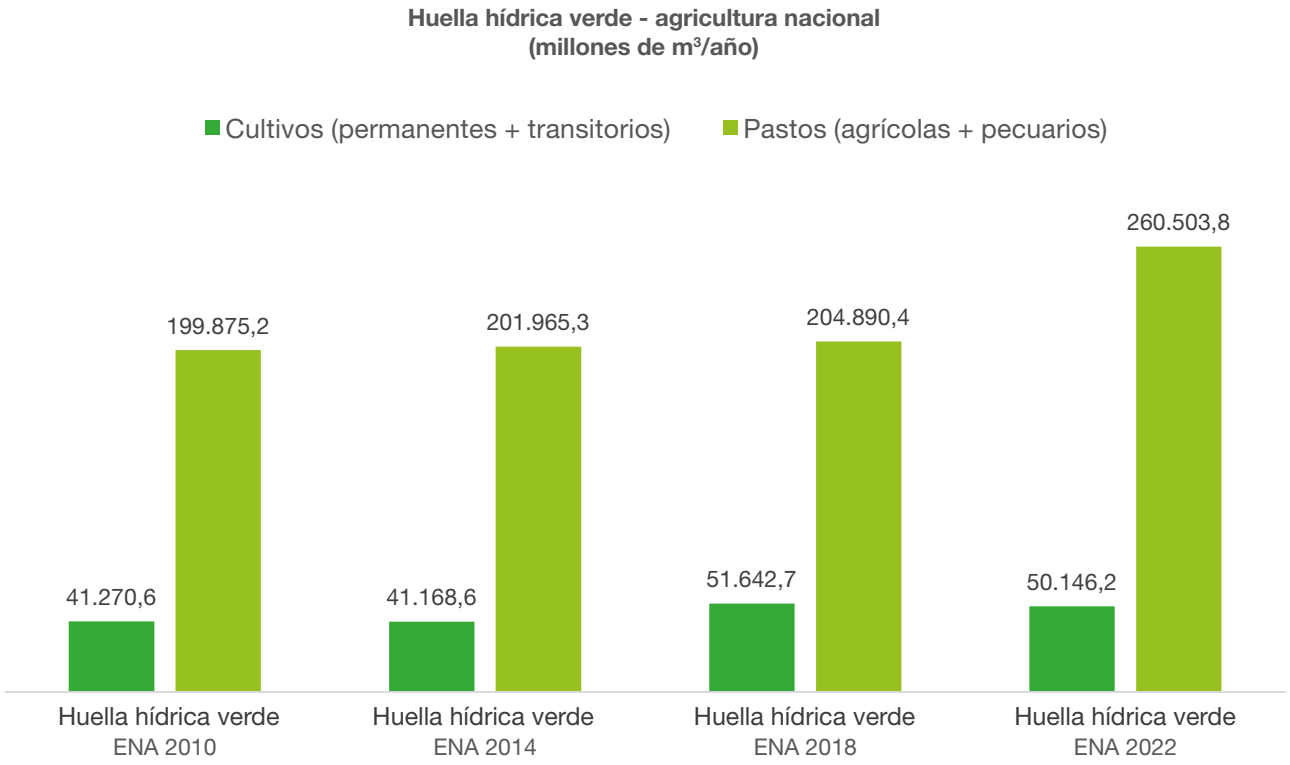



Figura 155. Uso del agua verde agrícola y pecuaria 2008-2020 (huella hídrica verde).

[4] La información disponible de pastos agrícolas y pecuarios para el año 2020 no permite hacer el ajuste de estimación para los valores de huella hídrica verde de los años 2008, 2012 y 2016, por lo que se presenta y analiza la serie con los datos publicados en los anteriores estudios nacionales del agua.

### 7.2.2 Usos del agua a nivel nacional – análisis sectorial

La demanda hídrica sectorial se estima de manera independiente para los sectores de la agricultura y poscosecha, pecuario y sacrificio, piscícola, doméstico, industria, construcción, servicios/oficial, minería, hidroenergía e hidrocarburos.

La demanda hídrica sectorial comparada para los años 2008 a 2020 se presenta en la Tabla 46, en donde se evidencia que, aunque para 2020 la demanda de agua en agricultura disminuyó en un 12,9 % en relación con el 2016, sigue siendo el sector con el mayor porcentaje de uso de agua.

El análisis de origen de la diferencia de resultados de 2020 frente a 2016 se explica de la misma forma que la diferencia identificada en la demanda total multisectorial, con los puntos específicos que hacen referencia al sector agrícola y pecuario. La demanda de agua para la generación de energía es el segundo lugar para todos los años.

La participación sectorial porcentual de la demanda hídrica para el 2020 se presenta en la Figura 156, en donde se evidencia que, para dicho año, la demanda hídrica se encuentra compuesta por un 43,25 % de participación asociada a usos del sector agrícola (agricultura y poscosecha) y un 66,75 % del total generado a partir de actividades no agrícolas (hidroenergía, piscícola, doméstico, pecuario y sacrificio, minería, hidrocarburos, industria, servicios/oficial y construcción).

El análisis de participación detallada sectorial permite identificar que los sectores de agricultura y poscosecha, hidroenergía, piscícola y doméstico concentran el 90 % de la demanda hídrica total nacional, siendo los dos primeros casi el 70 % de este valor. El análisis tendencial de participación desde 2008 muestra que se mantiene el comportamiento predominante de estos cuatro sectores con una participación que varía entre el 84 % y el 90 % de la demanda hídrica total nacional. El comportamiento se conserva también para los dos primeros sectores que han mantenido una participación de entre 69 % y 75 % de la demanda hídrica total nacional desde 2008.

Tabla 46. Demanda hídrica por sectores 2008-2020.

| Demanda hídrica (millones de m³/año) | ENA 2010 | ENA 2014 | ENA 2018 | ENA 2022 |
|---|---|---|---|---|
| | 2008 | 2012 | 2016 | 2020 |
| Agricultura y poscosecha | 19.202,0 | 16.775,2 | 16.066,9 | 13.984,1 |
| Hidroenergía | 6976,0 | 7740,3 | 9069,5 | 8224,4 |
| Piscícola | 2583,9 | 1232,9 | 3023,2 | 3971,8 |
| Doméstico | 2606,0 | 2963,4 | 2747,2 | 2857,9 |
| Pecuario y sacrificio[5] | 1411,9 | 1455,1 | 1554,9 | 1538,7 |
| Minería | 1577,1 | 2106,0 | 1074,6 | 660,9 |
| Hidrocarburos | - | 640,6 | 668,2 | 419,5 |
| Industria | - | 592,8 | 581,3 | 364,1 |
| Servicios/oficial | 528,2 | 481,8 | 570,9 | 210,7 |
| Construcción | - | - | 435,8 | 99,9 |

[5] El sector pecuario y sacrificio presenta un cambio significativo respecto a los valores publicados en estudios nacionales del agua anteriores generado por una mejora en el procedimiento de cálculo que corrigió las estimaciones anteriores y permitió realizar una comparación con bases de cálculo equivalentes.

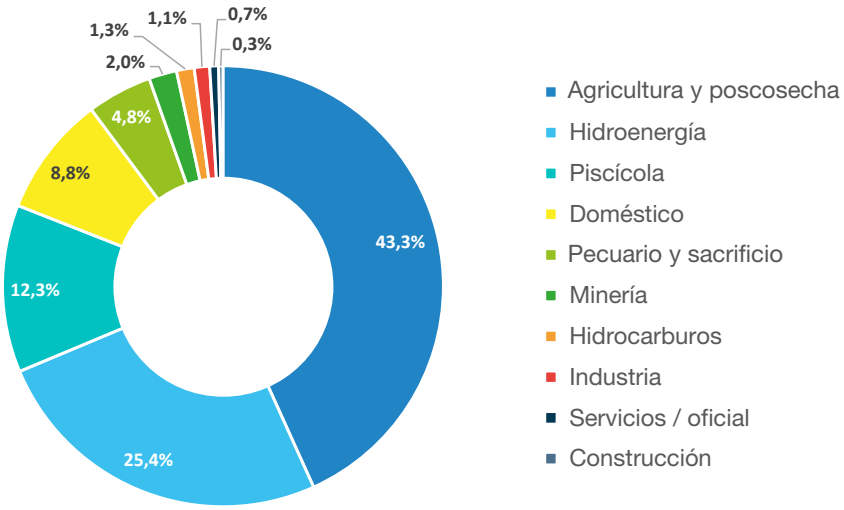



Figura 156. Participación sectorial en la demanda hídrica nacional en 2020.

La variación de participación sectorial porcentual de la demanda hídrica para los años 2008 a 2020 se presenta en la Figura 157, en donde se evidencia que la participación porcentual del sector de la agricultura y poscosecha entre 2008 y 2012 se mantuvo cerca de la mitad de la demanda hídrica total, con valores estimados de 55,0 % y 49,4 %, respectivamente. Se ha identificado una reducción en participación porcentual en 2016 y 2020 en 44,9 % y 43,3 %, respectivamente. Por su parte, la demanda hídrica en hidroenergía ha ganado participación en el total, pasando de 20,0 % en 2008 a 25,4 % en 2021. La demanda hídrica doméstica ha mantenido una participación más bien estable, entre un 7,5 % y 8,8 %; al igual que el sector pecuario, que está entre 4,0 % y el 4,8 %. Los demás sectores han tenido mayores fluctuaciones en su participación.

La Figura 158 muestra la serie de mapas de demanda hídrica sectorial en Colombia para el año 2020. El comportamiento sectorial de la demanda hídrica permite identificar sectores de alta dispersión territorial como: agrícola, pecuario y doméstico, frente a sectores con muy alta concentración geográfica de impacto, como los de hidroenergía, hidrocarburos o industria.

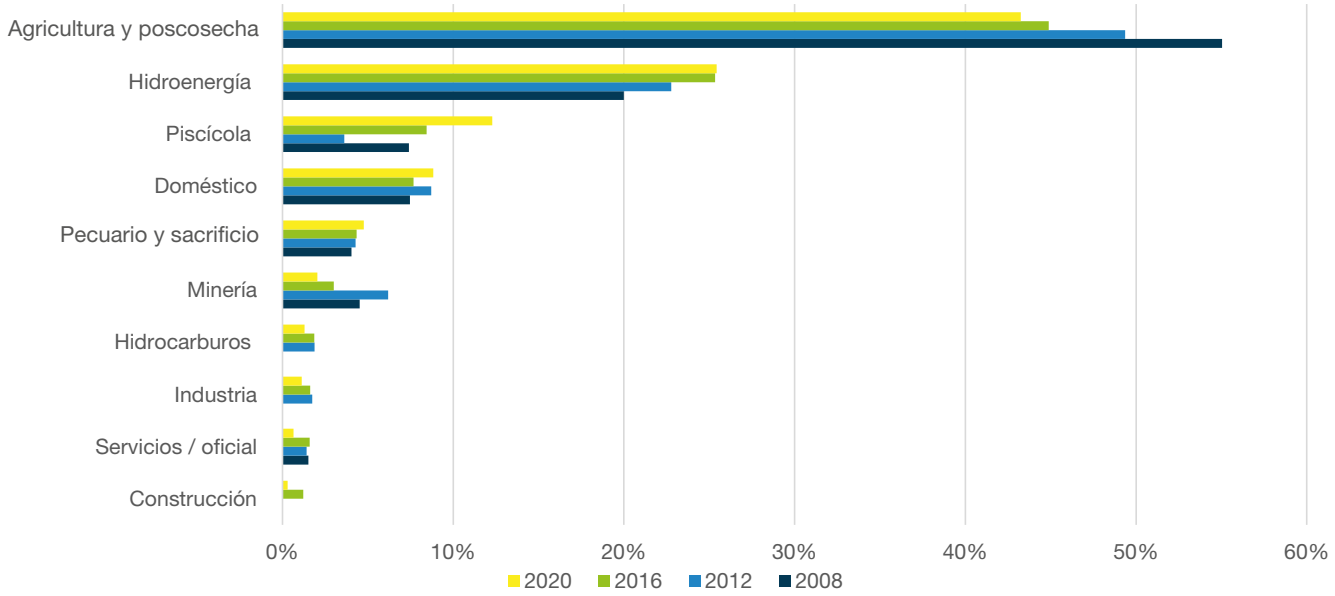



Figura 157. Comparación de la participación sectorial en la demanda hídrica total 2008-2020.

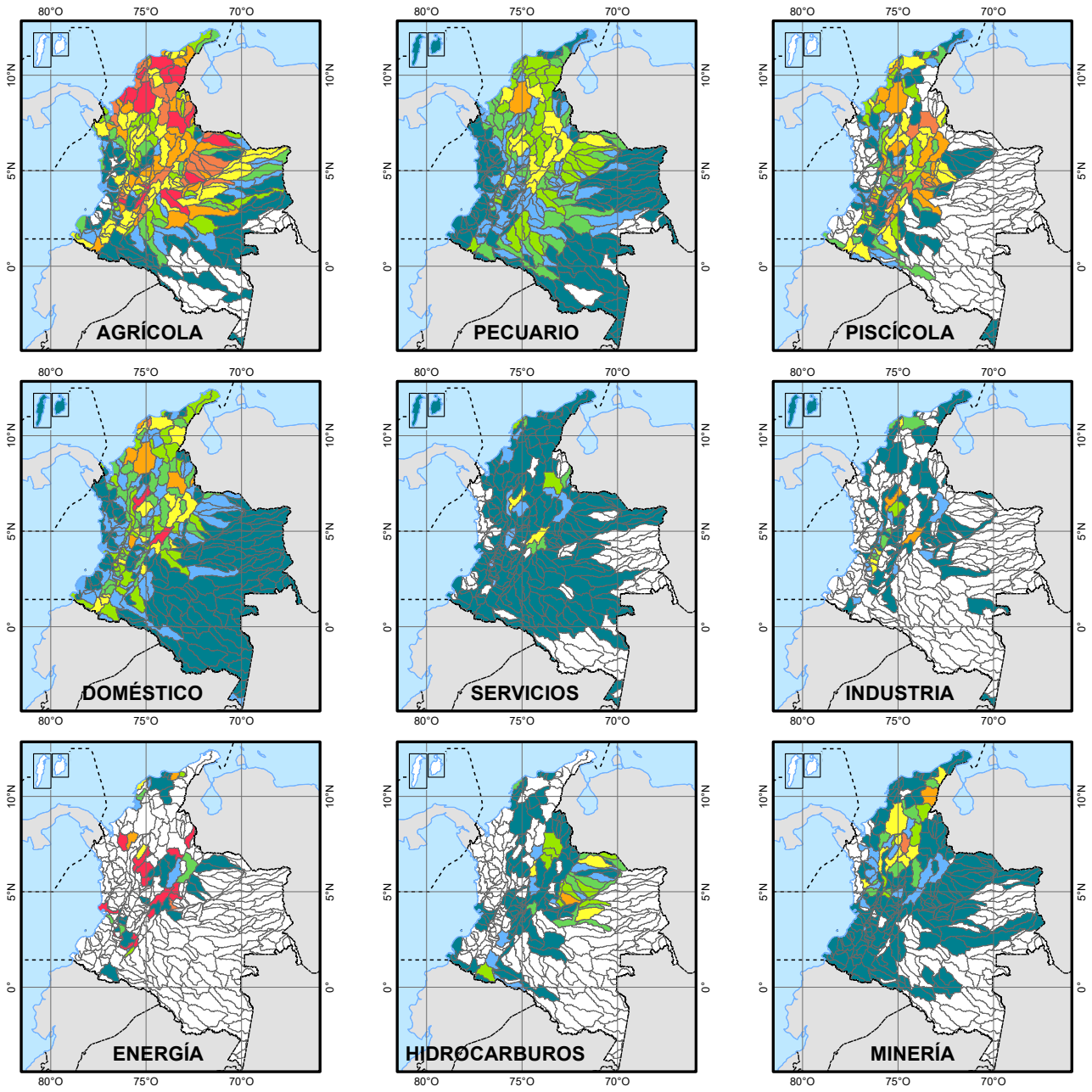



Figura 158. Mapa de distribución sectorial de la demanda hídrica en Colombia.

En la Tabla 47 se presenta la comparación de los valores totales estimados de la demanda hídrica y la huella hídrica azul para los dos últimos periodos analizados, años 2016 y 2020.

En dicha tabla se identifican las siguientes variaciones relevantes, con su respectivo análisis:

- Reducción en los valores estimados de la demanda hídrica y la huella hídrica azul para el sector agricultura y poscosecha asociado a la nueva información de pastos agrícolas (corte y forrajes), la cual presenta un nuevo análisis liderado por la UPRA que ajustó la información y el análisis disponible, principalmente en las áreas de pastos agrícolas y pecuarios.

- Reducción en la estimación de la demanda hídrica y la huella hídrica azul para el sector de hidroenergía asociada con menores volúmenes embalsados para el año 2020.

- Aumento en la estimación de la demanda hídrica y la huella hídrica azul para el sector piscícola asociado con nuevas bases de datos disponibles que aumentan la cobertura y calidad de la información disponible para el año 2020.

- Reducción en la estimación de la demanda hídrica y la huella hídrica azul para los sectores industria, servicios/oficial y construcción asociada con nuevas bases de datos disponibles que aumentan la cobertura y calidad de la información para el año 2020.

- Los sectores doméstico, pecuario y sacrificio, minería e hidrocarburos se mantienen con variaciones poco significativas; no obstante, para todos los sectores se identificó una mejora en la información disponible.

De igual manera, se analizó el porcentaje de agua extraída que no es retornada a la cuenca, la cual se representa como el porcentaje de huella hídrica azul sectorial en relación con la estimación de la demanda hídrica.

Tabla 47. Demanda hídrica y huella hídrica azul por sectores 2016 y 2020.

| | Demanda hídrica (millones de m³/año) | | Huella hídrica azul (millones de m³/año) | |
|---|---|---|---|---|
| | ENA 2018 (año 2016) | ENA 2022 (año 2020) | ENA 2018 (año 2016) | ENA 2022 (año 2020) |
| Agricultura y poscosecha | 16.066,9 | 13.984,1 | 8308,0 | 6283,4 |
| Hidroenergía | 9069,5 | 8224,4 | 457,3 | 436,4 |
| Piscícola | 3023,2 | 3971,8 | 27,4 | 156,5 |
| Doméstico | 2747,2 | 2857,9 | 285,0 | 368,9 |
| Pecuario y sacrificio | 1554,9 | 1538,7 | 977,4 | 1156,9 |
| Minería | 668,0 | 660,9 | 180,1 | 126,0 |
| Hidrocarburos | 581,0 | 419,5 | 6,1 | 41,5 |
| Industria | 1075,0 | 364,1 | 125,0 | 212,0 |
| Servicios/oficial | 571,0 | 210,7 | 42,4 | 23,1 |
| Construcción | 436,0 | 99,9 | 143,8 | 33,0 |

En la Figura 159 se muestra el porcentaje de agua extraída que no retorna a las cuencas y se puede ver cómo, para el año 2020, el sector que presenta un mayor porcentaje de agua extraída no retornada a la cuenca es el pecuario con un 75 %, seguido por los sectores industrial y agrícola con un consumo del 58 % y del 45 %, respectivamente.

Se resaltan dos sectores que presentan cambios significativos respecto al porcentaje de agua extraída que no es retornada a la cuenca estimado para 2016 y 2020: son los de hidrocarburos y la industria. En ambos casos se realizó el análisis detallado de fuentes de información; se encontró nueva información, con mayor nivel de detalle, que generó cambios significativos en la cuantificación, y que responden al uso de la más actualizada y detallada información oficial disponible para el sector a nivel nacional.

Para el caso del sector hidrocarburos, que paso de 1 % a 10 %, para el ENA 2022 se contó con información detallada de Ecopetrol sobre procesos y usos del agua, además de información de dos refinerías más. Para el caso del sector industria, que pasó de 12 % a 58 %, hubo una clara mejora en la información disponible, la cual fue complementada y corroborada con datos del RUA y del SIRH.

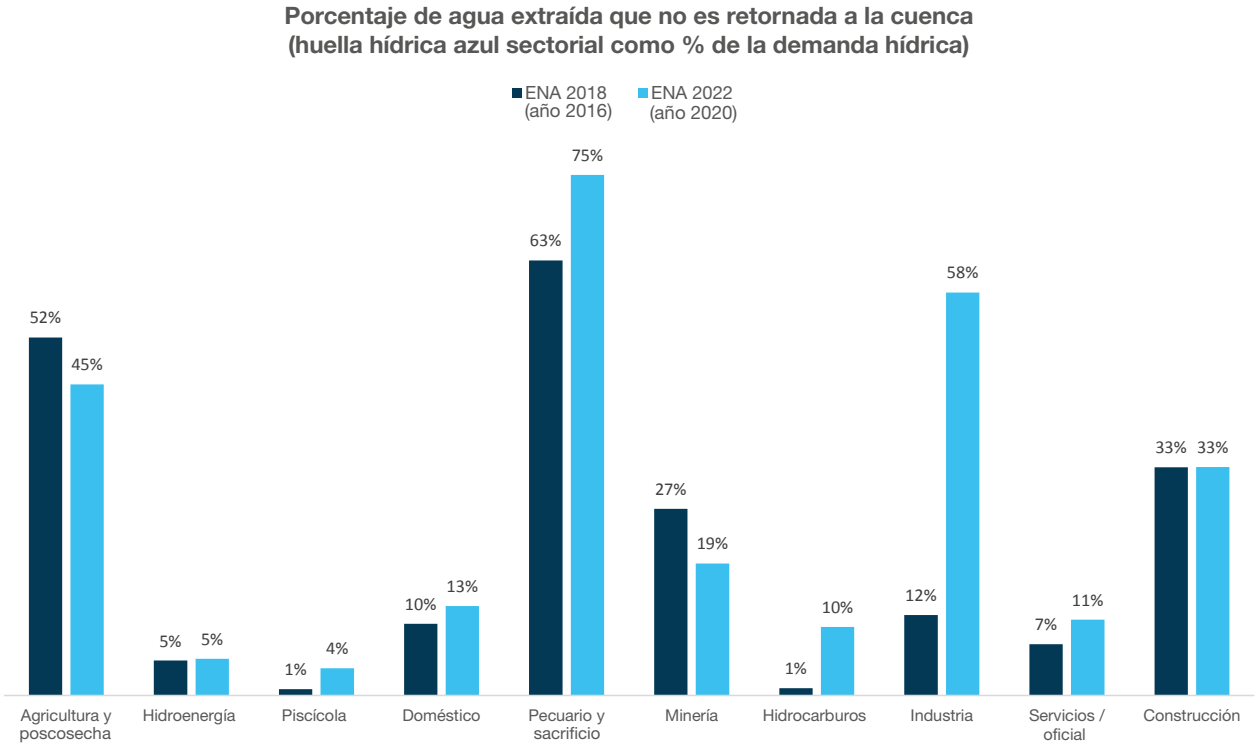



Figura 159. Huella hídrica azul sectorial como porcentaje de la demanda hídrica en 2016 y 2020.

## 7.2.3 Flujos de retorno

Los flujos de retorno de agua hacen referencia al volumen de agua que se reincorpora o que es devuelto a la red de drenaje de la cuenca como remanente de los volúmenes usados o aprovechados en los procesos productivos de las actividades económicas y en el consumo humano. Las descargas por agua turbinada y los vertimientos industriales conforman una parte del caudal de retorno (Ideam, ENA 2014).

Como concepto complementario, las pérdidas están asociadas al uso de agua —desde la captación hasta la entrega nuevamente a la fuente— por las actividades antrópicas, sean estas económicas o no. Las pérdidas de agua, una vez se extrae de la fuente para uso en los procesos productivos, se puede aducir a uso ineficiente o a falta de mantenimiento de la infraestructura, entre otros. Por lo tanto, las pérdidas se asumen como el agua que habiendo entrado en el proceso productivo no se

usa en este, sino que sale del mismo por exceso o por fuga. Los vertimientos no se consideran pérdidas.

Se introducen dos nuevos conceptos relacionados con el reúso y la recirculación de agua: si bien los artículos 51, 52, 59 y 77 del Decreto 2811 de 1974 establecen que el aprovechamiento de aguas ya utilizadas —servidas o negras, entre otras— requiere concesión, la Ley 1955 de 2019 dispone que debe modificarse la reglamentación en esta materia teniendo en cuenta criterios e información técnica. Es por ello por lo que el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible expidió la Resolución 1256 del 23 de noviembre de 2021 que reglamenta el uso de aguas residuales. Esta resolución no aplica para el uso de aguas residuales como fertilizantes o acondicionadoras de suelos. Según lo citado en la resolución, la recirculación:

> […] es el uso de las aguas residuales en operaciones y procesos unitarios dentro de la misma actividad económica que las genera y por parte del mismo usuario generador, sin que exista contacto con el suelo al momento de su uso, salvo cuando se trate de suelo de soporte de infraestructura.

Por su parte, el reúso «es el uso de las aguas residuales por parte de un usuario receptor, para un uso distinto al que las generó». El reúso se autoriza en actividades agrícolas tales como irrigación de cultivos y actividades conexas o complementarias; y en actividades industriales, en procesos como los manufactureros de transformación o explotación, generación de energía, minería e hidrocarburos. A la fecha no se cuenta con información disponible sobre los volúmenes de reúso y recirculación del agua en el país.

La Tabla 48 incluye los flujos de retorno de agua de los sectores analizados de manera individual por cada uno de sus componentes: vertimientos, pérdidas y descargas; de esta forma, complementa el balance de masas del volumen de agua usado, retornado y no retornado a la cuenca.

En el caso del sector de hidroenergía, el agua turbinada en 2020 fue de 86.449,4 millones de $m^3$, volumen que se considera como las descargas realizadas después de generar energía eléctrica. Este volumen corresponde al 85 % de los flujos totales de retorno estimados en 102.304 millones de $m^3$.

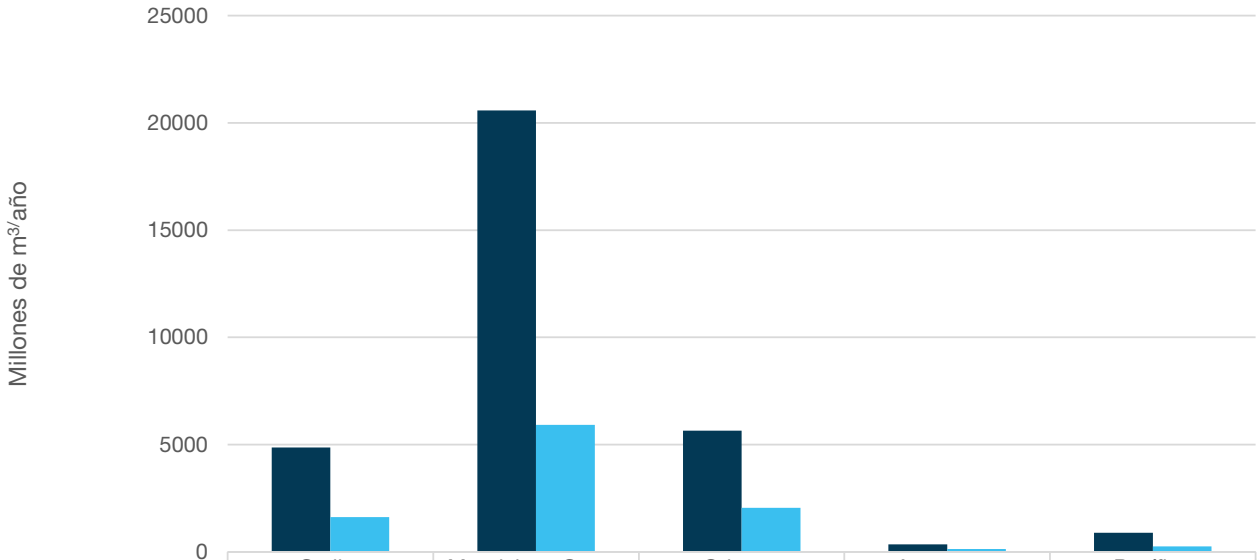
Tabla 48. Flujos de retorno de agua de los sectores, 2020.

| (millones de $m^3$/año) | Demanda hídrica | Huella hídrica azul | Flujos de retorno | Pérdidas | Vertimientos | Descargas |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Agricultura y poscosecha | 13.984,1 | 6283,4 | 7699,8 | 7699,8 | | |
| Hidroenergía | 8224,4 | 436,4 | 86.449,4 | | | 86.449,4 |
| Piscícola | 3971,8 | 156,5 | 3820,8 | | | |
| Doméstico | 2857,9 | 368,9 | 2570,8 | 642,7 | 1928,1 | |
| Pecuario y sacrificio | 1538,7 | 1156,9 | 381,7 | 229,0 | 152,7 | |
| Minería | 660,9 | 126,0 | 534,9 | | | |
| Hidrocarburos | 419,5 | 41,5 | 378,0 | | | |
| Industria | 364,1 | 212,0 | 224,1 | 39,5 | 184,6 | |
| Servicios/oficial | 210,7 | 23,1 | 177,5 | 44, | 133,1 | |
| Construcción | 99,9 | 33,0 | 66,9 | | | |
| | 32.331,9 | 8837,7 | | | | |

### 7.2.4 Distribución de los usos del agua por áreas hidrográficas

A partir de la cuantificación, el análisis y la validación de la demanda y las huellas hídricas sectoriales, se procede con la consolidación multisectorial para la estimación del impacto territorial del uso del agua. La Figura 160 muestra gráficamente la distribución geográfica de la demanda hídrica y de la huella hídrica azul por área hidrográfica.

**Distribución geográfica de los usos del agua multisectorial nacional 2020**



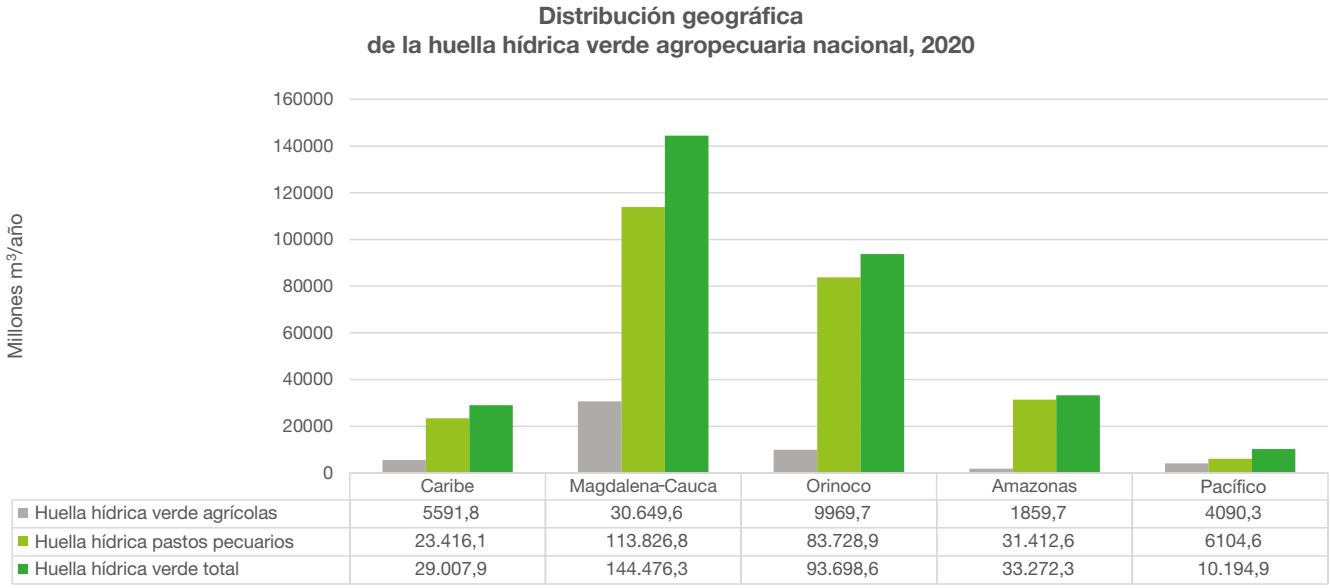

| | Caribe | Magdalena-Cauca | Orinoco | Amazonas | Pacífico |
|---|---|---|---|---|---|
| Demanda hídrica | 4859,0 | 20.579,5 | 5652,3 | 350,3 | 890,9 |
| Huella hídrica azul | 1614 | 5917 | 2044 | 128 | 253 |

Figura 160. Áreas hidrográficas. Demanda de agua y huella hídrica azul.

La demanda hídrica por área hidrográfica se distribuye así: 64 % para el área hidrográfica Magdalena-Cauca, 18 % para Orinoco, 15 % para Caribe, 3 % para Pacífico y 1 % para Amazonas. Por su parte, la huella hídrica azul se distribuye: 59 % para Magdalena-Cauca, 21 % Orinoco, 16 % Caribe, 3 % Pacífico y 1 % Amazonas. La relación de uso permite estimar que, en promedio, un 33 % del agua extraída no retorna a la cuenca, con valores que oscilan entre el 29 % para el área Magdalena-Cauca y el 37 % para el área hidrográfica de Amazonas.

La Figura 161 muestra gráficamente la distribución geográfica de la huella hídrica verde para las cinco áreas hidrográficas.

El resultado de la huella hídrica verde se analiza en tres bloques: el primero, hace posible identificar la concentración de huella hídrica verde agrícola (agricultura de secano en cultivos permanente, transitorios, y pastos de corte y forrajes); el segundo, la huella hídrica verde de pastos pecuarios; y el tercero, la huella hídrica verde total. En el área Magdalena-Cauca, la huella hídrica verde agrícola corresponde al 59 % del total de este bloque, un 44 % de huella hídrica verde de pastos pecuarios y un 47 % a la huella hídrica verde total. Para la huella hídrica verde agrícola existe una importante localización en las áreas hidrográficas Caribe y Orinoco, con 11 % y 19 %, respectivamente, quedando las de Pacífico y Amazonas con menos de 8 % cada una. Para la huella hídrica verde de pastos pecuarios y la huella hídrica verde total existe una importante concentración en el segundo lugar de importancia en el área hidrográfica de Orinoco, quedando las otras áreas con valores por debajo de 12 % cada una.




| | Caribe | Magdalena-Cauca | Orinoco | Amazonas | Pacífico |
|---|---|---|---|---|---|
| Huella hídrica verde agrícolas | 5591,8 | 30.649,6 | 9969,7 | 1859,7 | 4090,3 |
| Huella hídrica pastos pecuarios | 23.416,1 | 113.826,8 | 83.728,9 | 31.412,6 | 6104,6 |
| Huella hídrica verde total | 29.007,9 | 144.476,3 | 93.698,6 | 33.272,3 | 10.194,9 |

Figura 161. Distribución de la huella hídrica verde agropecuaria por área hidrográfica.

## 7.2.5 Análisis del uso de agua multisectorial por subzonas hidrográficas

En este ítem, se consideran las veinte subzonas hidrográficas (SZH) con mayor participación y se presentan los mapas de todo Colombia para *demanda hídrica*, *huella hídrica azul* y *huella hídrica verde*.

El análisis de demanda hídrica por subzonas hidrográficas permite identificar los territorios con la mayor participación porcentual para el año 2020.

La Figura 162 muestra las veinte SZH con mayor participación porcentual en la demanda hídrica multisectorial para el año 2020.

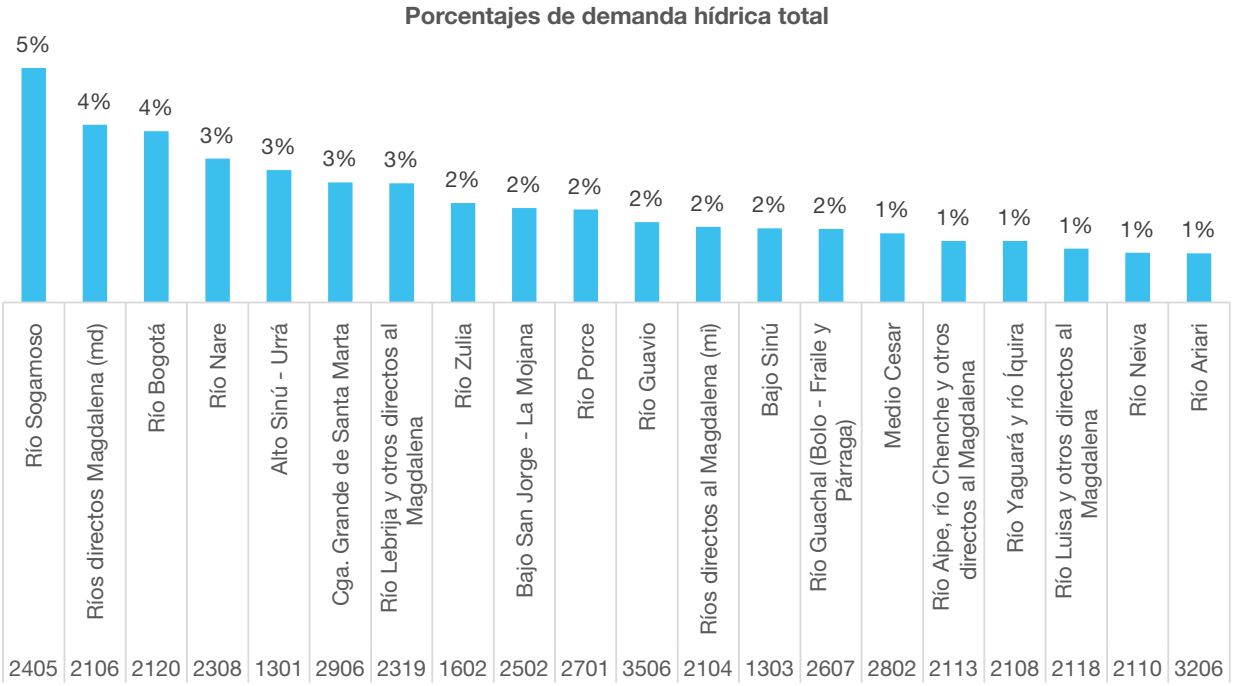



Figura 162. Participación en la demanda hídrica por subzona hidrográfica, 2020.

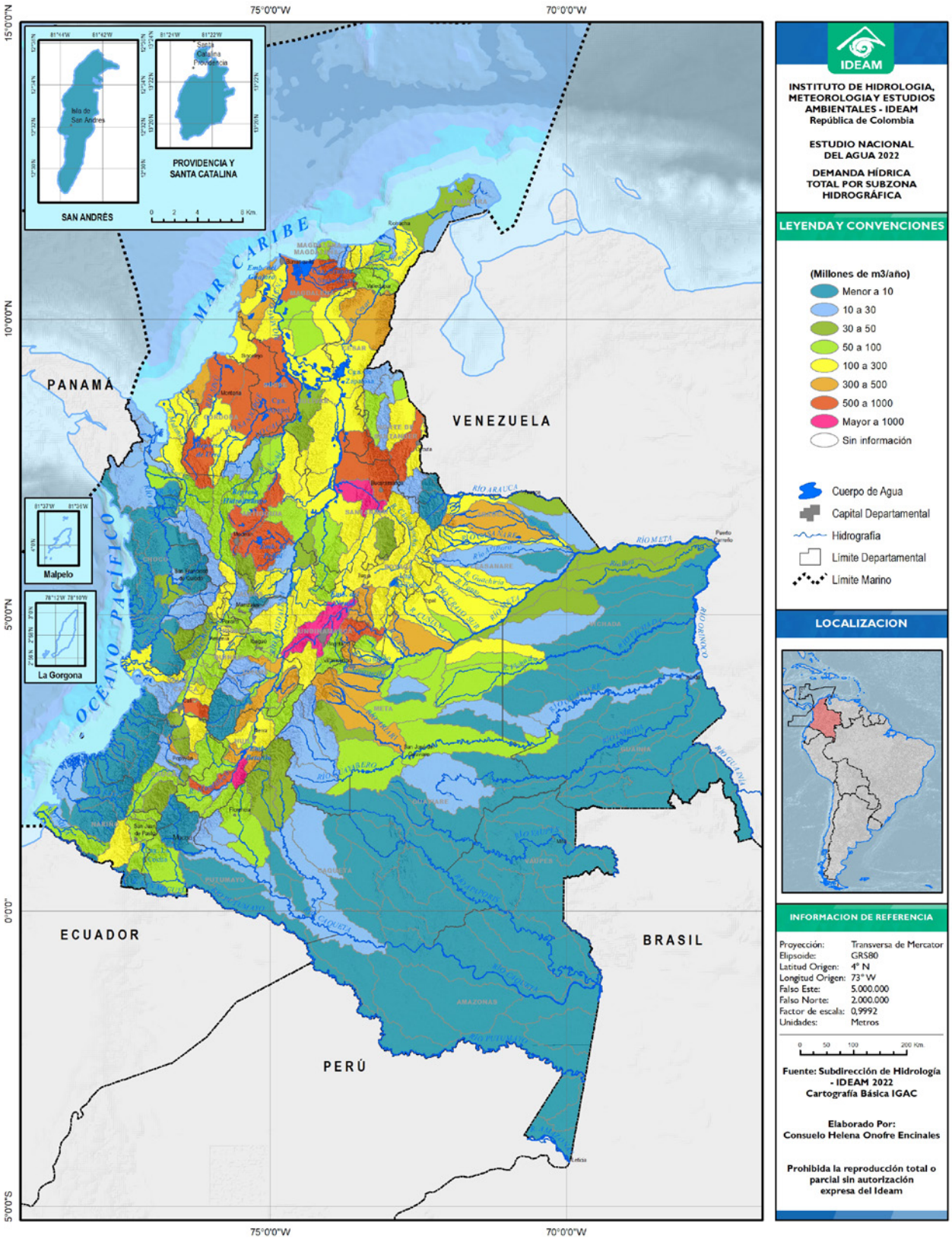



Figura 163. Mapa de demanda hídrica en Colombia 2020.

Estas veinte SZH concentran alrededor del 44 % de la demanda hídrica total del país; las diez primeras concentran aproximadamente el 30 % del total, mientras que las cinco primeras hacen cerca del 18 % del total. La mitad de la demanda hídrica total se encuentra en veintiséis SZH, lo que implica que está en tan solo el 8 % de las SZH (de un total de 316 SZH).

La Figura 163 muestra el mapa con la distribución por SZH de la demanda hídrica en Colombia para el año 2020.

En esta distribución se identifica una importante concentración en las SZH asociadas al sector hidroeléctrico y en las SZH asociadas a áreas con alta vocación agrícola de cultivos permanentes con requerimiento hídrico no satisfecho con la precipitación disponible, lo que significa una demanda potencial de riego; en este aspecto sobresalen cultivos como el banano y la palma de aceite en la zona norte del país.

En la gráfica de la Figura 164 se muestran las veinte SZH con la mayor participación porcentual en la huella hídrica azul multisectorial para el año 2020.

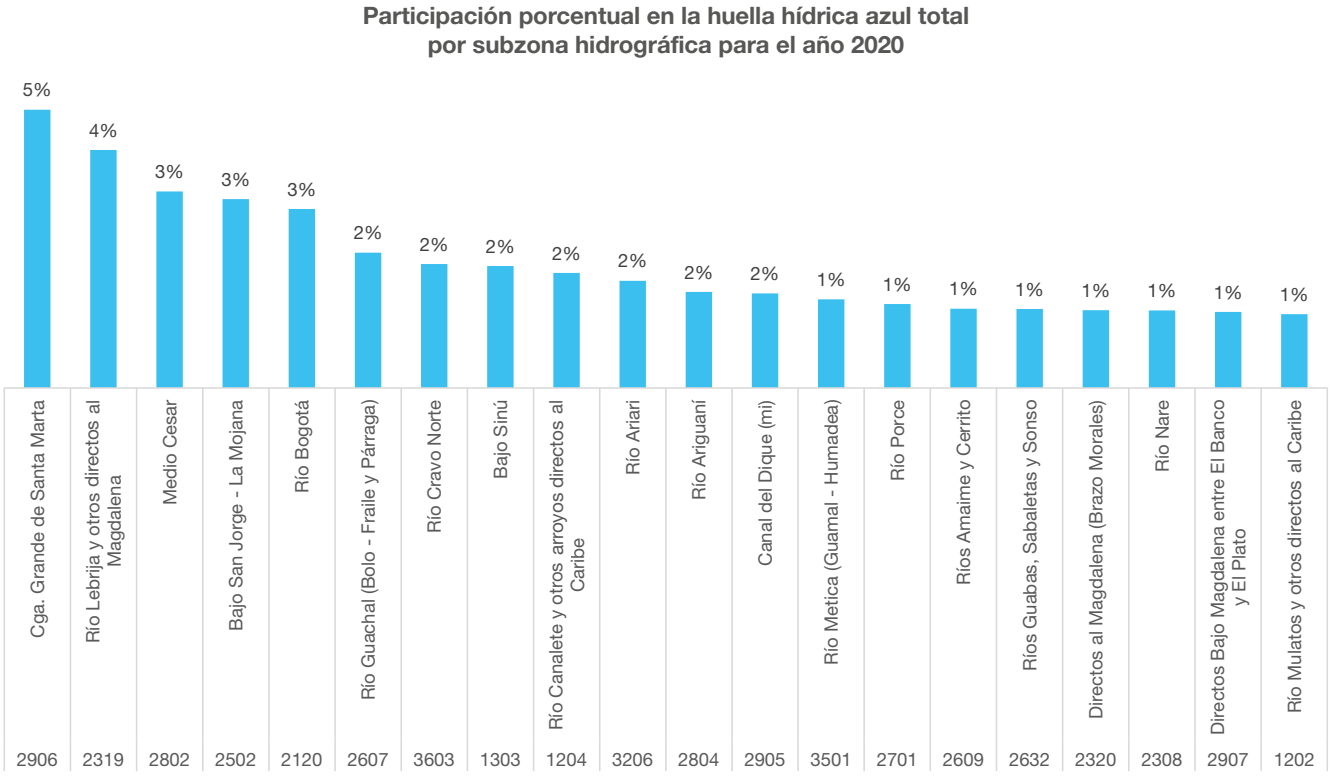



Figura 164. Participación porcentual en la huella hídrica azul total por subzona hidrográfica, 2020.

El análisis de huella hídrica azul por subzonas hidrográficas (SZH) permite identificar los territorios con la mayor participación porcentual en usos que generan apropiación humana de agua, logrando un uso mutuamente excluyente con otros usos para el año 2020. Estas SZH concentran un 41 % de la huella hídrica azul total, siendo las diez primeras un 27 % del total, y las cinco primeras, un 18 % del total. La mitad de la huella hídrica azul total está concentrada en las primeras veintiocho SZH, lo que implica que el 50 % de la demanda hídrica total está en tan solo el 9 % de las SZH.

La Figura 165 muestra el mapa de huella hídrica azul en Colombia para el año 2020; de manera coherente con la demanda hídrica multisectorial, se pueden identificar allí las SZH asociadas con alta vocación agrícola de cultivos permanentes que generan alta demanda hídrica en la zona norte del país.

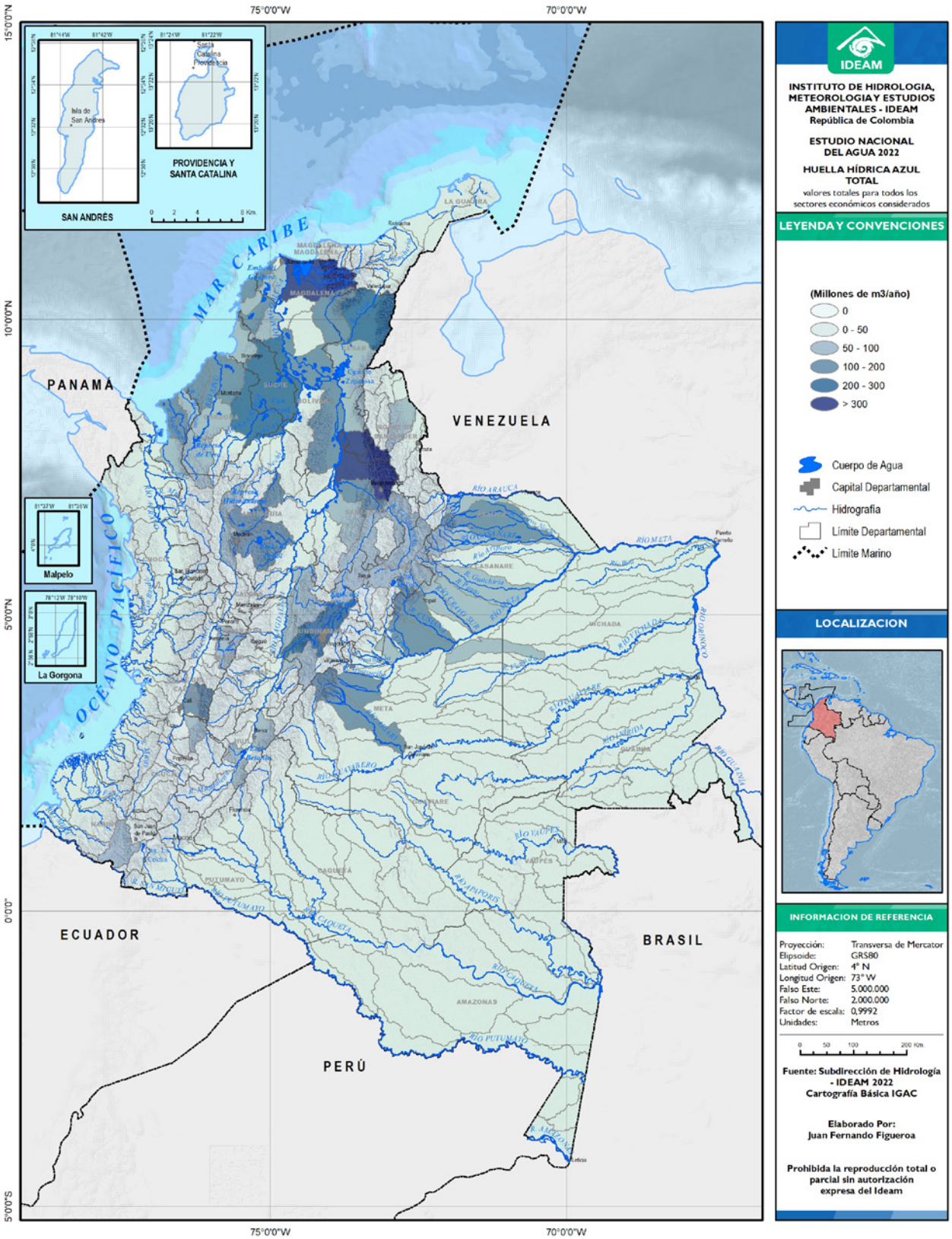



Figura 165. Mapa de la huella hídrica azul en Colombia.

La gráfica de la Figura 166 presenta las veinte SZH con la mayor participación porcentual en la huella hídrica verde agropecuaria para el año 2020.

El análisis de huella hídrica verde por subzonas hidrográficas identifica los territorios con la mayor participación porcentual en uso agropecuario de agua verde para el año 2020. Estas veinte SZH concentran un 31 % de la huella hídrica verde total, siendo las diez primeras un 19 % del total, y las cinco primeras, un 12 % del total. La mitad de la huella hídrica verde total está concentrada en las primeras 41 SZH, lo que implica que el 50 % de la demanda hídrica total está en tan solo el 13 % de las SZH.

**Participación porcentual en la huella hídrica verde agropecuaria total por subzona hidrográfica, año 2020**

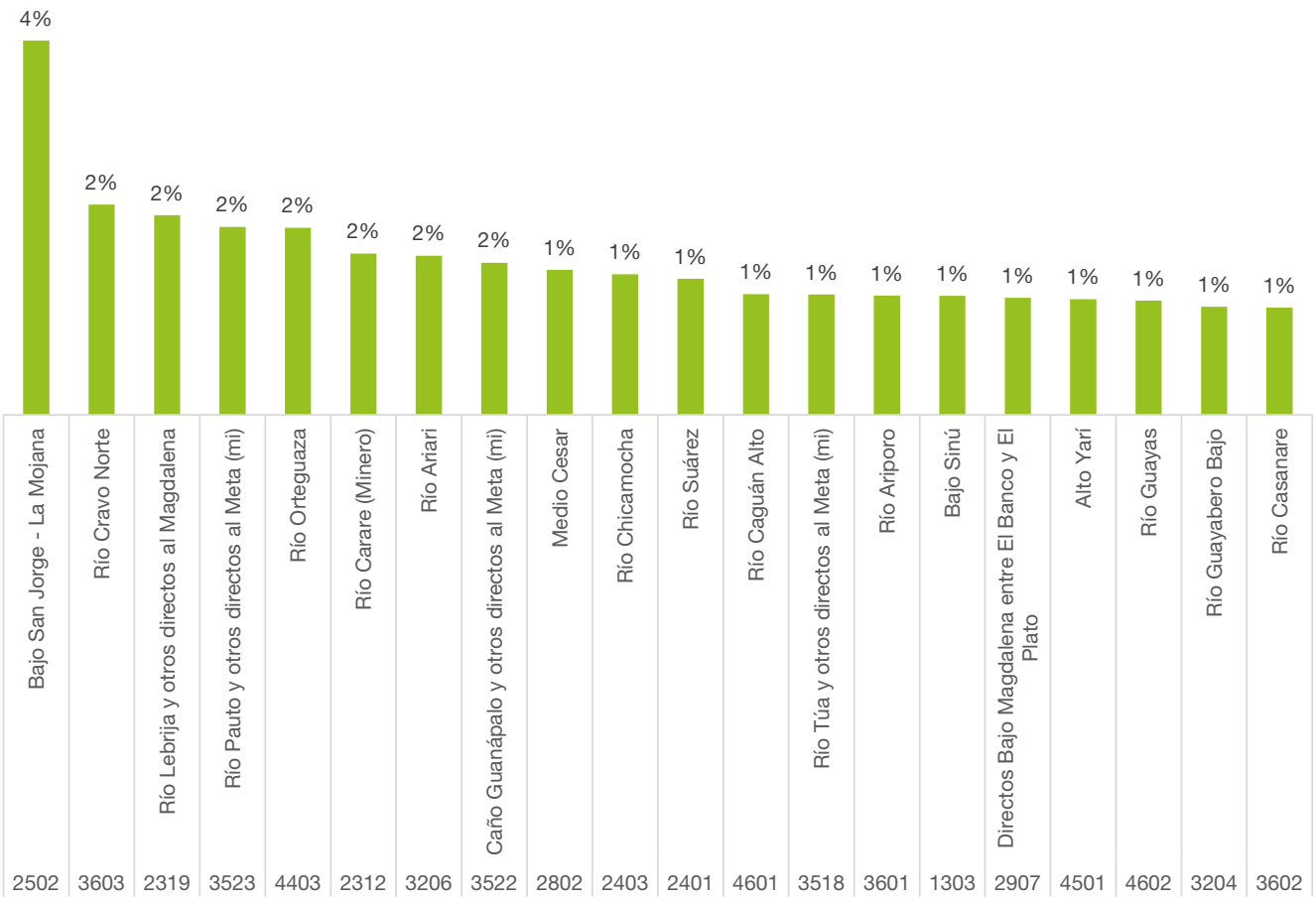



Figura 166. Participación porcentual en la huella hídrica verde total por subzona hidrográfica, 2020.

El mapa de la huella hídrica verde en Colombia para el año 2020 (Figura 167) permite identificar la dispersión geográfica de la huella hídrica verde en coherencia con la dispersión geográfica del sector agrícola y pecuario en el país. Por otra parte, solo hay tres SZH que tienen un porcentaje de huella hídrica agrícola que supera el 24 % del total: Río Lebrija y otros directos al Magdalena, Río Ariari y Río Suárez; estas SZH son los territorios que tienen una mayor coexistencia entre la agricultura y la ganadería en cuanto al uso del agua verde.

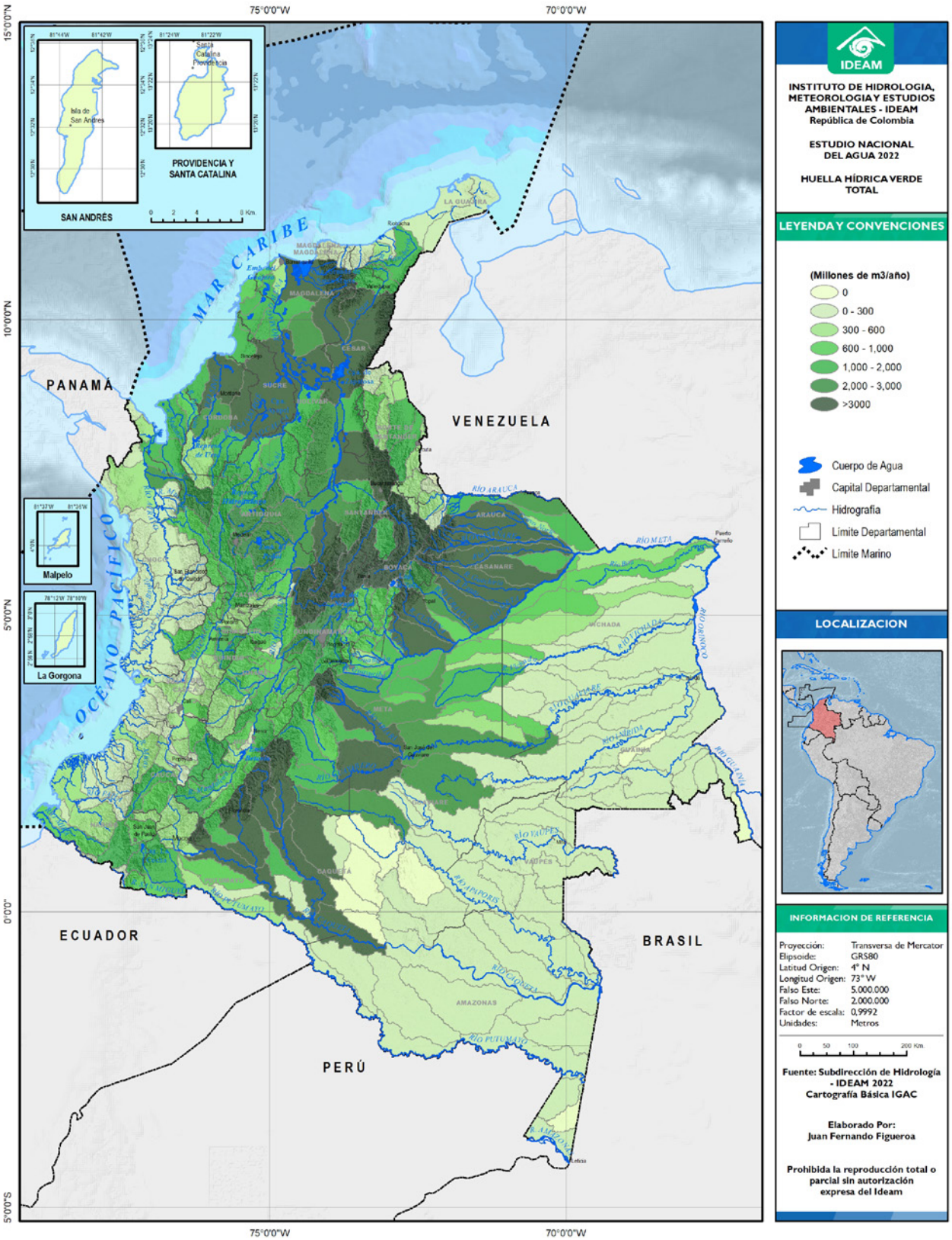



Figura 167. Mapa de la huella hídrica verde en Colombia.

### 7.2.6 Distribución geográfica de usos sectoriales por departamentos, áreas y subzonas hidrográficas

Se presenta la distribución geográfica de los usos del agua (demanda hídrica y huella hídrica) de forma que se puede tener una mayor comprensión sobre el origen de la presión sectorial generada sobre el recurso hídrico desde diferentes unidades territoriales. El análisis se presenta por zonificación hidrográfica (subzonas hidrográficas) y por división político-administrativa (departamentos).

La primera mirada sectorial se presenta analizando las cinco áreas hidrográficas y dejando en claro la presión sobre el uso del agua que domina en todo el territorio, generada desde los sectores agrícola y pecuario. En la Figura 168 se muestra la distribución porcentual del uso de agua estimada para cada una de las áreas hidrográficas (AH) en Colombia.

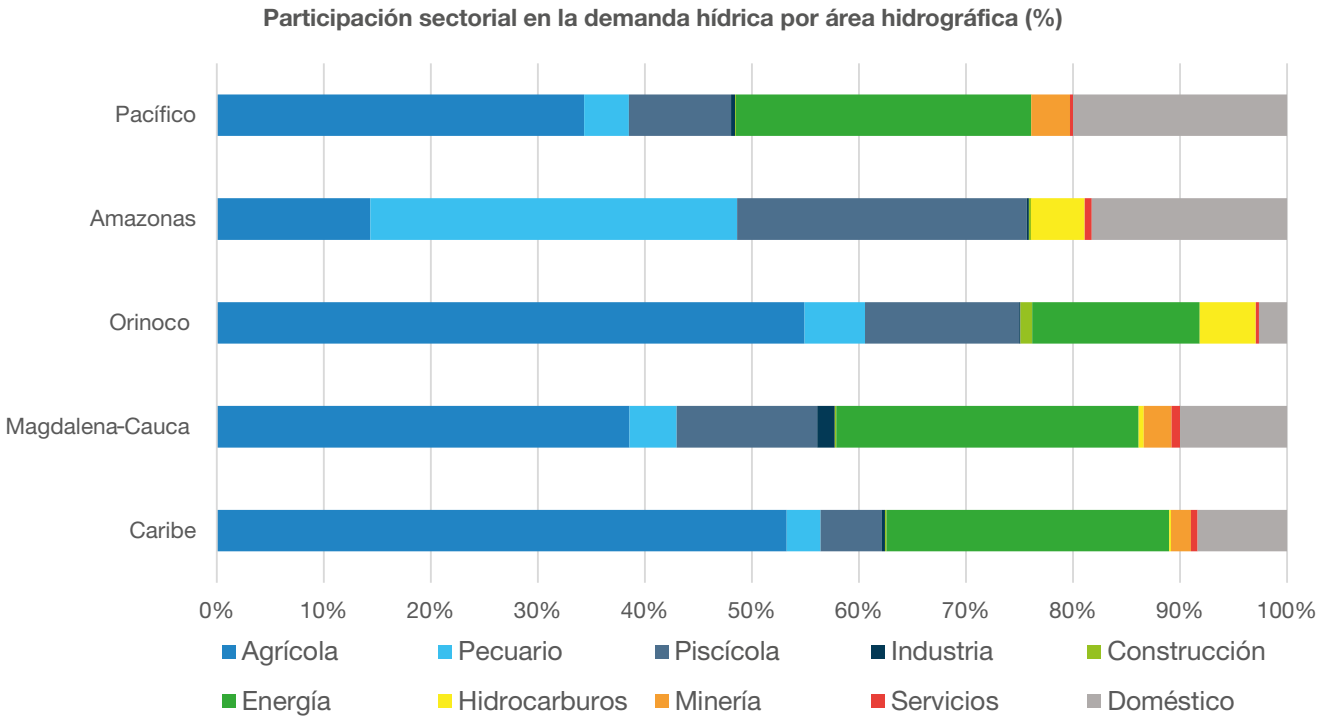



Figura 168. Participación sectorial en la demanda hídrica por área hidrográfica.

En esta distribución se resalta que, en el AH Magdalena-Cauca, el 39 % de la demanda hídrica se concentra en la agricultura y el 28 % en generación eléctrica (hidroeléctrica y termoeléctrica). Estos dos sectores representan el 67 % del uso de agua; si se agregan el uso piscícola y el doméstico, alcanza el 90 % del total.

La segunda AH con mayor uso de agua es el Orinoco, con un uso agrícola que supera el 55 % del total del uso de agua. Le siguen el sector de generación eléctrica y piscícola. Estos tres sectores concentran una participación del 85 % de la demanda hídrica total en esta AH. La tercera AH en uso de agua es la Caribe, con la misma estructura de demanda de agua que Orinoco; sin embargo, solo los sectores agrícola y de energía participan con el 89 % del total de uso de agua en la región. En el área hidrográfica Pacífico, ubicada en el cuarto lugar, se observa la demanda distribuida en: el sector agrícola, 34 %; energía, con un 28 %; doméstico, el 20 %; y el piscícola,

10 %. Por último, el AH de Amazonas concentra más del 60 % en usos pecuario, piscícola y agrícola.

La Tabla 49 permite identificar los valores específicos de participación porcentual sectorial por área hidrográfica para el año 2020.

Tabla 49. Distribución porcentual de la demanda hídrica por área hidrográficas y sectores.

| Sector / área | Caribe | Magdalena - Cauca | Orinoco | Amazonas | Pacífico |
|---|---|---|---|---|---|
| Agrícola y poscosecha | 53 % | 39 % | 55 % | 14 % | 34 % |
| Energía | 26 % | 28 % | 16 % | 0 % | 28 % |
| Piscícola | 6 % | 13 % | 14 % | 27 % | 10 % |
| Doméstico | 8 % | 10 % | 3 % | 18 % | 20 % |
| Pecuario y sacrificio | 3 % | 4 % | 6 % | 34 % | 4 % |
| Minería | 2 % | 3 % | 0 % | 0 % | 4 % |
| Industria | 0 % | 2 % | 0 % | 0 % | 0 % |
| Servicios | 1 % | 1 % | 0 % | 1 % | 0 % |
| Hidrocarburos | 0 % | 0 % | 5 % | 5 % | 0 % |
| Construcción | 0 % | 0 % | 1 % | 0 % | 0 % |

La Figura 169 muestra la distribución porcentual de la huella hídrica azul estimada para cada una de las AH en Colombia y la Tabla 50 especifica los valores de participación porcentual sectorial por área hidrográfica para el año 2020.

En cuanto a la huella hídrica azul —como volumen que no retorna a la cuenca a causa de una actividad asociada a un sector específico—, la presión por apropiación humana del agua está distribuida en los diferentes sectores, salvo en el AH Amazonas, en donde existe una clara vocación de uso pecuario.

La distribución porcentual de la huella hídrica azul por AH permite identificar cuatro de las cinco áreas hidrográficas en las cuales el valor más alto proviene del sector agrícola, variando desde el 69 % para Magdalena-Cauca, 73 % para Pacífico, 84 % para Orinoco, hasta el 85 % para Caribe. Para estas mismas áreas hidrográficas, el sector pecuario constituye el segundo sector que más consume agua, con 12 %, 11 %, 11 % y 7 % para las áreas hidrográficas Magdalena-Cauca, Orinoco, Pacífico y Caribe, respectivamente. Solo el área hidrográfica Amazonas presenta una tendencia diferente, siendo el sector pecuario el de mayor huella hídrica azul con un 66 %, seguido por el sector agrícola con un 24 %. El resto de los sectores presentan participaciones menores o iguales al 6 % en la huella hídrica azul para todas las áreas hidrográficas.

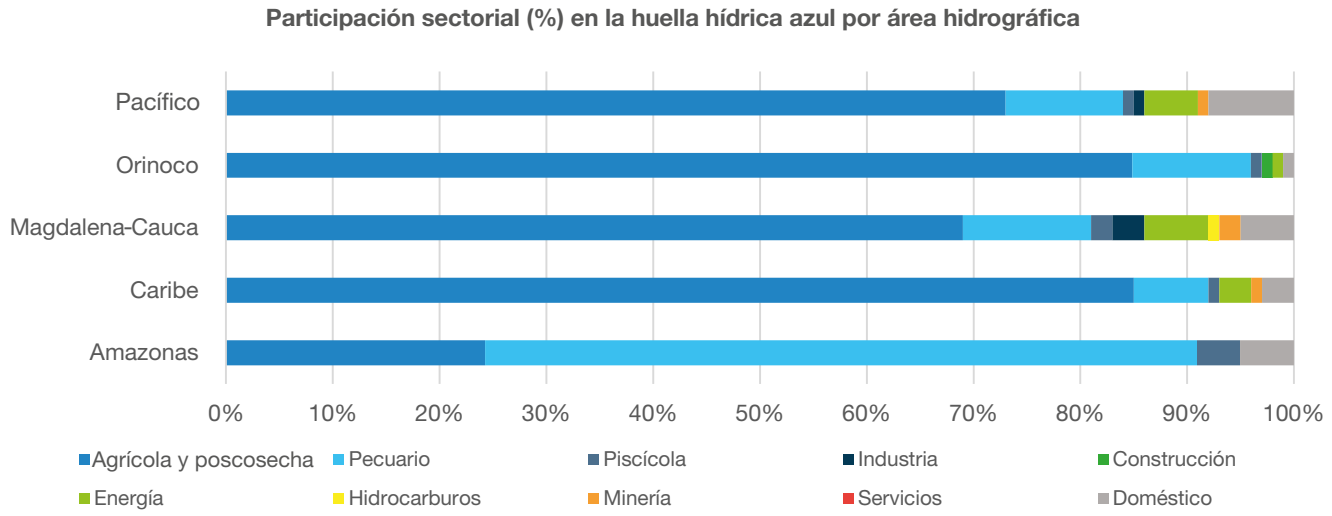



Figura 169. Participación sectorial en la huella hídrica azul por área hidrográfica.

Tabla 50. Participación de la huella hídrica azul por área hidrográficas y sectores.

| Sector/AH | Amazonas | Caribe | Magdalena - Cauca | Orinoco | Pacífico |
|---|---|---|---|---|---|
| Agrícola | 24 % | 85 % | 69 % | 84 % | 73 % |
| Pecuario | 66 % | 7 % | 12 % | 11 % | 11 % |
| Piscícola | 4 % | 1 % | 2 % | 1 % | 1 % |
| Industria | 0 % | 0 % | 3 % | 0 % | 1 % |
| Construcción | 0 % | 0 % | 0 % | 1 % | 0 % |
| Energía | 0 % | 3 % | 6 % | 1 % | 5 % |
| Hidrocarburos | 0 % | 0 % | 1 % | 0 % | 0 % |
| Minería | 0 % | 1 % | 2 % | 0 % | 1 % |
| Servicios | 0 % | 0 % | 0 % | 0 % | 0 % |
| Doméstico | 5 % | 3 % | 5 % | 1 % | 8 % |

Desde la mirada por departamentos, la Figura 170 muestra la participación de la demanda hídrica multisectorial por departamento, lo cual permite identificar situaciones diversas; se encuentran algunos territorios con un comportamiento similar al identificado en las grandes áreas hidrográficas, pero hay otros que claramente muestran vocaciones diferentes en el uso del agua, como lo pueden ser la generación de energía hidroeléctrica, la industria o el abastecimiento a la población.

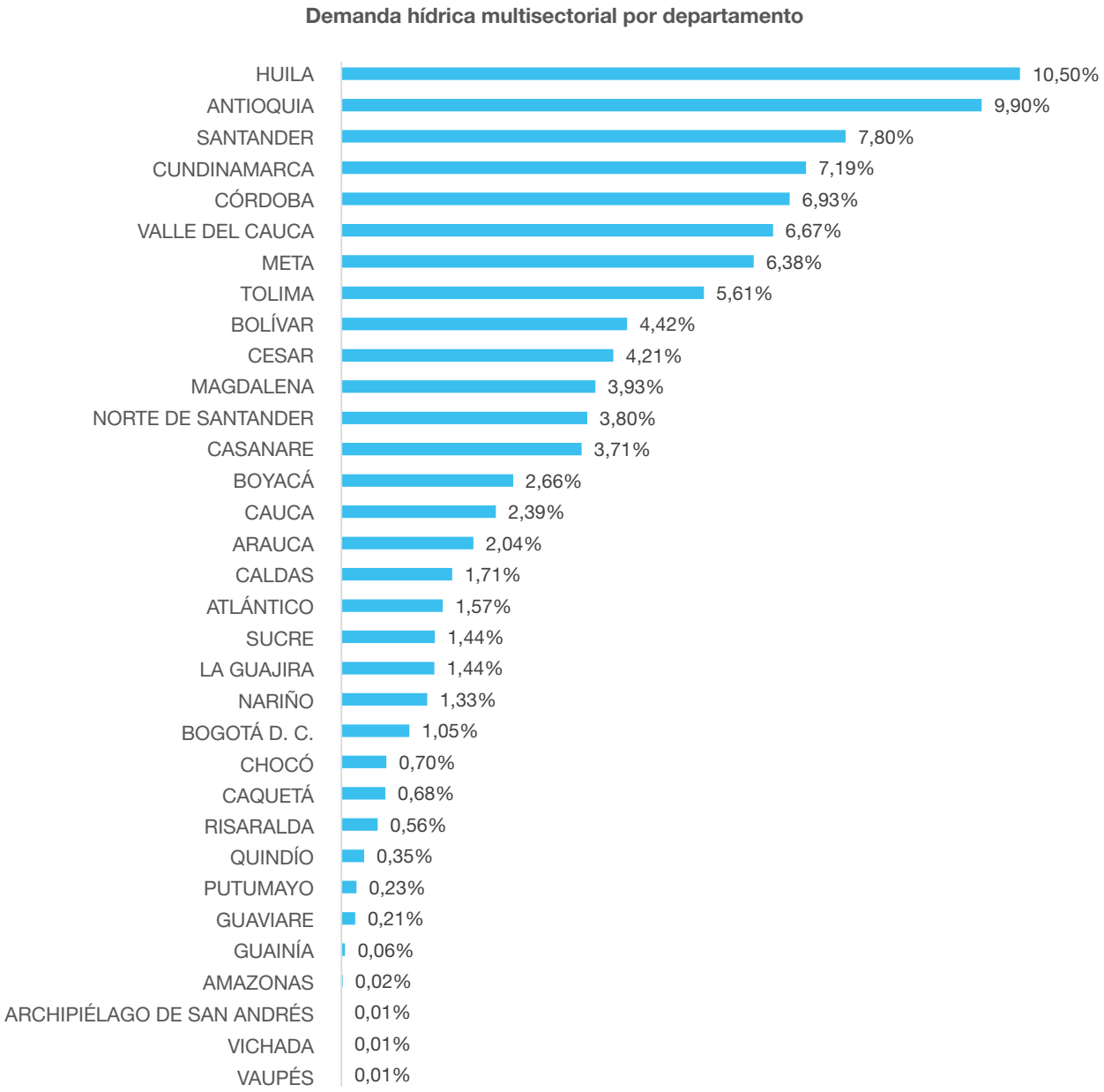



Figura 170. Participación de la demanda hídrica multisectorial por departamento.

En la Figura 171 se muestra la composición sectorial de la demanda hídrica por departamento que identifica la incidencia sectorial en la demanda hídrica multisectorial desde una perspectiva decreciente.

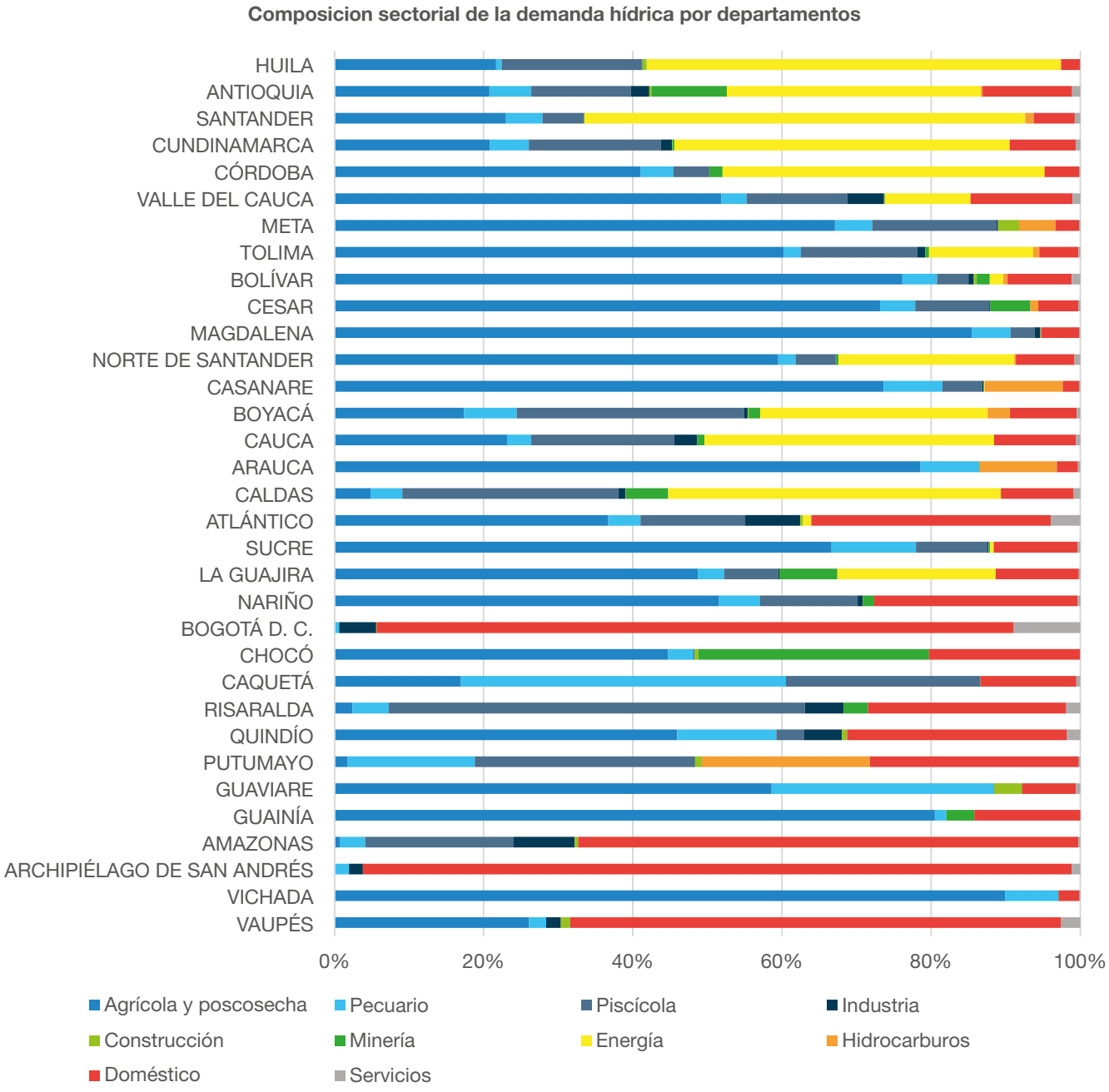



Figura 171. Composición sectorial de la demanda hídrica por departamento.

A continuación, se presentan los análisis correspondientes a cada uno de los sectores revisados para las dos visiones geográficas descritas anteriormente. Se incluye el análisis de los sectores de agricultura y poscosecha, pecuario y sacrificio, piscícola, industria, minería, hidroenergía, hidrocarburos, doméstico y servicios/oficial. Para el análisis de detalle sectorial se excluye el sector construcción por el alto nivel de incertidumbre en la información disponible.

## Sector agrícola y poscosecha

El análisis de la huella hídrica y la demanda hídrica del sector agropecuario implica estudiar el requerimiento hídrico de los cultivos y su relación con la oferta hídrica natural, asociada a la variabilidad temporal y espacial de la precipitación, y a las características de los suelos. Un déficit hídrico a causa de escasez en la precipitación implicaría una necesidad de riego; a este volumen de agua se le conoce como *requerimiento de agua azul* o *huella hídrica azul*; sin embargo, la extracción de agua de un sistema superficial o subterráneo implica unas pérdidas, según las eficiencias en el sistema de riego. Así las cosas, al volumen realmente extraído de un sistema se le conoce como *demanda hídrica*. La metodología para la estimación tanto de la huella hídrica como de la demanda ha sido descrita con detalle en el ENA 2014; en las versiones del ENA 2018 se han realizado algunos ajustes y, a continuación, se presenta la información más relevante para la actualización de este capítulo en el ENA 2022.

La estimación del uso del agua agrícola se aplica para los cultivos permanentes, transitorios y los pastos. En el análisis se incluyen 22 cultivos permanentes (Tabla 51) y 18 cultivos transitorios (Tabla 52); y en ambos tipos de cultivo se incluyen las categorías «otros permanentes» y «otros transitorios», para abarcar la totalidad de cultivos del país; se consideran también cuatro categorías de pastos (Tabla 53). Las áreas que se emplearon para el sector agropecuario fueron analizadas y concertadas con las principales entidades que son fuente de la estadística agrícola nacional, como la UPRA (EVA-UPRA, s. f.), el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MinAgricultura, 2019), el DANE y las agremiaciones de productores.

Tabla 51. Cultivos permanentes para el ENA 2022.

| Cultivos permanentes para el ENA 2022 | |
|---|---|
| Café | Flores y follajes de campo:<br>incluye cultivos de anturio, astromelia, clavel, crisantemo, girasol, heliconia, hortensia, orquídea, rosa, flores y follajes, asparagus, cordeline cinta, eucalipto *baby blue*, fitosporum, helecho, palma robelina, *tree fern*. |
| Palma de aceite | |
| Caña (panelera y azucarera) | |
| Plátano (incluye plátano de exportación) | |
| Cacao | |
| Yuca | Otros permanentes:<br>incluye el resto de cultivos permanentes que no son considerados dentro de los principales: achiote, achira, agraz, aguaje, alfalfa, anón, arándano, arazá, arracacha, así, badea, bananito, batata, borojó, brevo, caducifolios, cardamomo, chachafruto, chamba, champiñón, chirimoya, cholupa, chonque, chontaduro, ciruela, cocona, copoazú, cúrcuma, curuba, dátil, durazno, estropajo, feijoa, flor de jamaica, frambuesa, fresa, frutales varios, granadilla, guama, guanábana, guandul, gulupa, higo, higuerilla, iraca, jatropha, jengibre, lulo, macadamia, malanga, mamey, mamoncillo, mangostino, manzana, manzanilla, maracuyá, marañón, mimbre, morera, níspero, palma amarga, palmito, papaya, papayuela, pepa de pan, pera, pimienta, pitahaya, plantas aromáticas, plantas aromáticas y medicinales, quinua, rambután, ruda, ruscus, sábila, sacha inchi, estevia, tabaco negro, tamarindo, té, uchuva, uva, uva caimarona, yacón, zapote. |
| Coca | |
| Aguacate | |
| Banano (incluye banano de exportación) | |
| Cítricos (lima, limón, mandarina, pomelo, tangelo, toronja, cítricos) | |
| Caucho | |
| Mango | |
| Ñame | |
| Piña | |
| Naranja | |
| Coco | |
| Mora | |
| Fique | |
| Guayaba | |
| Tomate de árbol | |

Tabla 52. Cultivos transitorios para el ENA 2022.

| Cultivos transitorios para el ENA 2022 |
|---|
| Maíz (tecnificado y tradicional) |
| Arroz secano mecanizado |
| Arroz riego |
| Papa |
| Fríjol |
| Arroz secano manual |
| Soya |
| Hortalizas:<br>incluye los cultivos de acelga, ahuyama, ají, ajo, apio, berenjena, brócoli, calabacín, calabaza, cilantro, col, coliflor, espinaca, guatila, lechuga, pepino, pimentón, rábano, remolacha, repollo, hortalizas varias. |
| Arveja |
| Tomate |
| Cebolla de rama |
| Cebolla de bulbo |
| Zanahoria |
| Tabaco rubio |
| Algodón |
| Trigo |
| Sorgo |
| Otros transitorios:<br>incluye los cultivos transitorios que no se consideran dentro de los principales: achicoria, ajonjolí, albahaca, amaranto, anís, avena, batata, caléndula, cebada, centeno, champiñón, chía, cimarrón, cúrcuma, estropajo, flor de jamaica, garbanzo, haba, habichuela, jengibre, lenteja, malanga, maní, manzanilla, melón, orellana, patilla, perejil, plantas aromáticas, poleo, quinua, romero, ruba, ruda, tomillo, ulluco, flores y follajes transitorios. |

Tabla 53. Clasificación de tipos de pastos para el ENA 2022.

| Categoría tipos de pastos para el ENA 2022 |
|---|
| Pastos de corte |
| Forraje |
| Pastos mejorados |
| Pastos naturales |

Mientras que la huella hídrica es una medida del consumo real de agua de riego por parte de los cultivos o riego efectivo, la demanda es una medida de la extracción de agua destinada a suplir las necesidades de los cultivos; es decir, tiene en cuenta un porcentaje de agua de riego que no llega a la planta, sino que retorna al medio ambiente debido a pérdidas por conducción y por las ineficiencias en los sistemas de riego. La estimación de la demanda se realiza con base en la eficiencia de los sistemas de riego, para lo cual se clasificaron los distritos, tal como se muestra en la Tabla 54.

Tabla 54. Eficiencias asignadas al tipo de riego para los sistemas de riego en Colombia[6].

| Tipo de riego[7] | Eficiencia de riego (%) |
|---|---|
| Aspersión | 75 |
| Gravedad | 50 |
| Goteo | 90 |
| Aspersión y gravedad | 60 |
| Aspersión y goteo | 75 |
| Aspersión y sin información | 60 |
| Sin información[8] | 50 |
| **Otros casos** | |
| Sin distritos de riego[9] | 60 |
| Arroz riego | 25 |

Fuente: elaboración propia, con base en Cabezas et al., 2002.

Las eficiencias de riego se asignaron para cada cultivo según estuvieran reportados en los distritos de riego. En el caso de que no se tuviera información, se asumió una eficiencia de riego del 60 %. A continuación (Figura 172), se presentan los resultados consolidados del sector por subzonas hidrográficas:

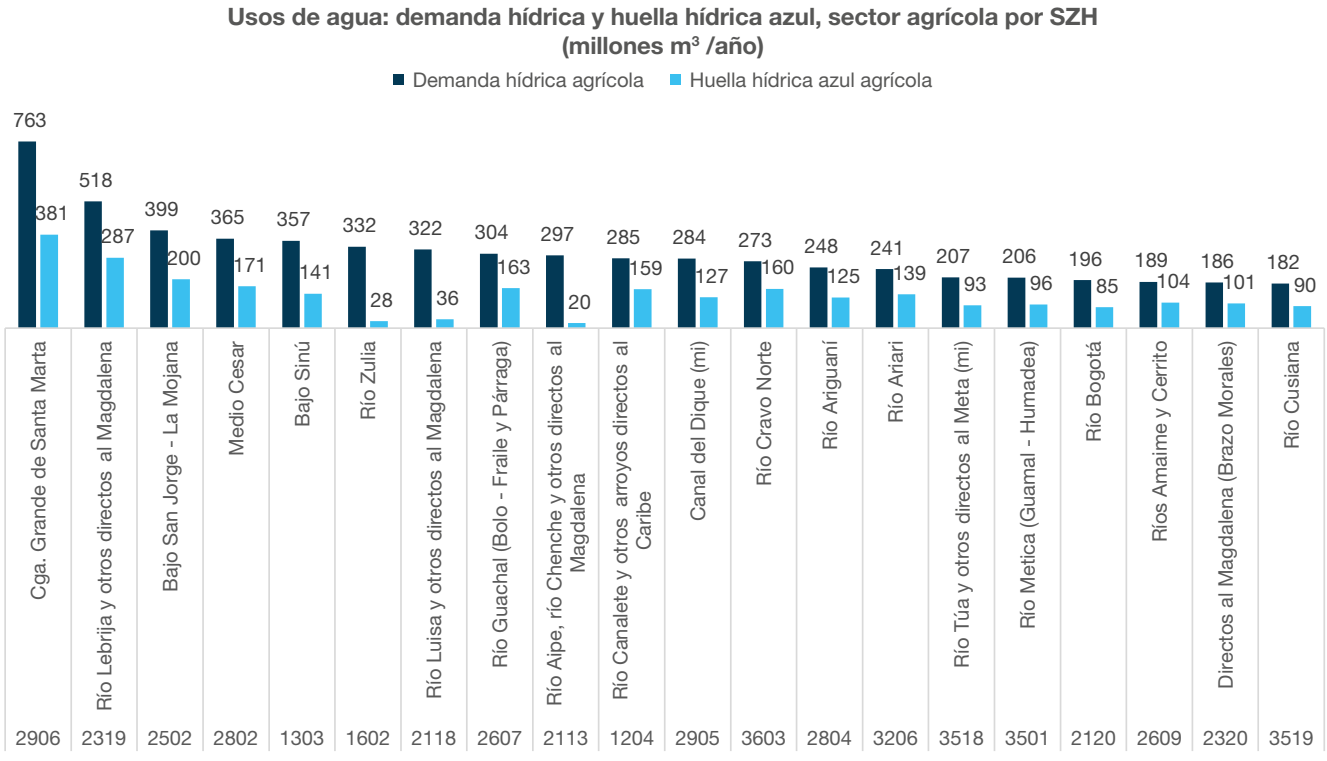



Figura 172. Usos de agua (demanda hídrica y huella hídrica azul) sector agrícola por SZH.

[6] En el Estudio Nacional del Agua 2014 (Ideam, 2015), se definieron eficiencias de riego por municipio y cultivo considerando la existencia de distritos de riego (ADR, 2007) e información específica publicada por dichos distritos. No hay información más detallada hasta ahora.
[7] Tipo de riego reportado en distritos de riego (ADR, 2007).
[8] Sin información de sistema de riego reportado por los distritos de riego (ADR, 2007).
[9] Se asignó un valor promedio esperado para sistemas de riego mixtos.

Desde los usos del agua del sector agrícola y poscosecha se identifican las principales subzonas hidrográficas y departamentos que concentran dicho uso. En la Figura 172, se resaltan las veinte SZH con mayor valor del uso del agua (demanda hídrica y huella hídrica azul) y las veinte principales subzonas hidrográficas que representan el 44 % del total de la demanda del sector. Las cinco primeras concentran un 17 % de toda la demanda hídrica agrícola y poscosecha y participan con 5 %, 4 %, 3 %, 3 % y 3 %, respectivamente. En términos de huella hídrica azul, las veinte SZH con mayor uso del agua concentra un 41 % del total sectorial, siendo las cinco primeras un 19 % del total.

Del análisis de los departamentos, se identifica la participación de Meta, Valle del Cauca, Magdalena, Tolima y Bolívar como los departamentos con mayor demanda hídrica agrícola (requerimiento potencial de riego agrícola), que en conjunto concentran el 41 % del total de la demanda hídrica agrícola y poscosecha. En la Figura 173 se presenta la demanda hídrica del sector agrícola por departamento.

En los mapas de la Figura 174, se muestra la distribución geográfica y temporal de la *huella hídrica azul* agropecuaria que permite identificar las zonas y las épocas del año donde se estima existe una demanda hídrica asociada a un requerimiento de riego de cultivos, resaltando los tres primeros meses del año y la región norte de Colombia.

En los mapas de la Figura 175 se presenta la distribución geográfica y temporal de la *huella hídrica verde* del sector agropecuario que identifica las zonas y las épocas del año donde se estima existe una variación de huella hídrica verde principalmente asociada a usos del suelo en las áreas de cultivos transitorios.

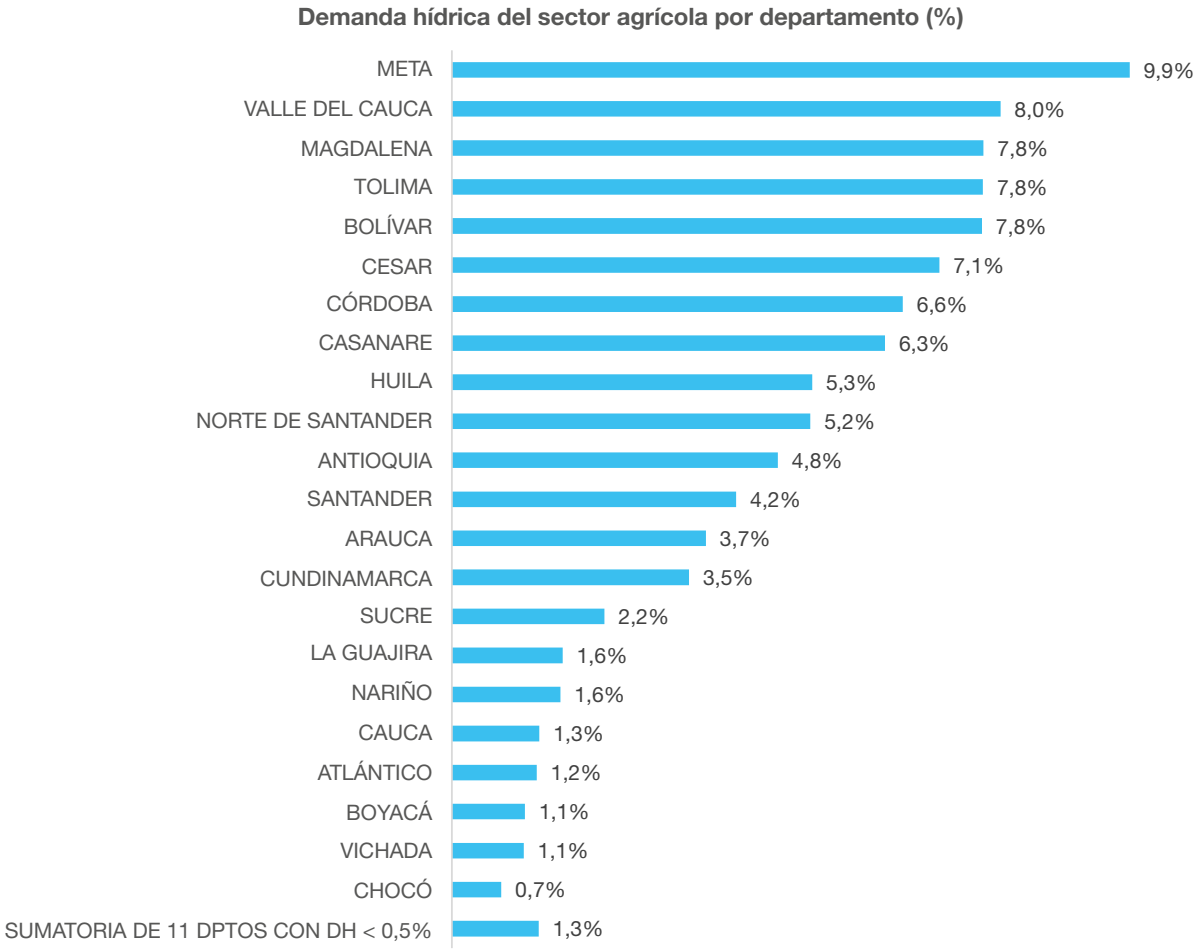



Figura 173. Demanda hídrica del sector agrícola por departamento.

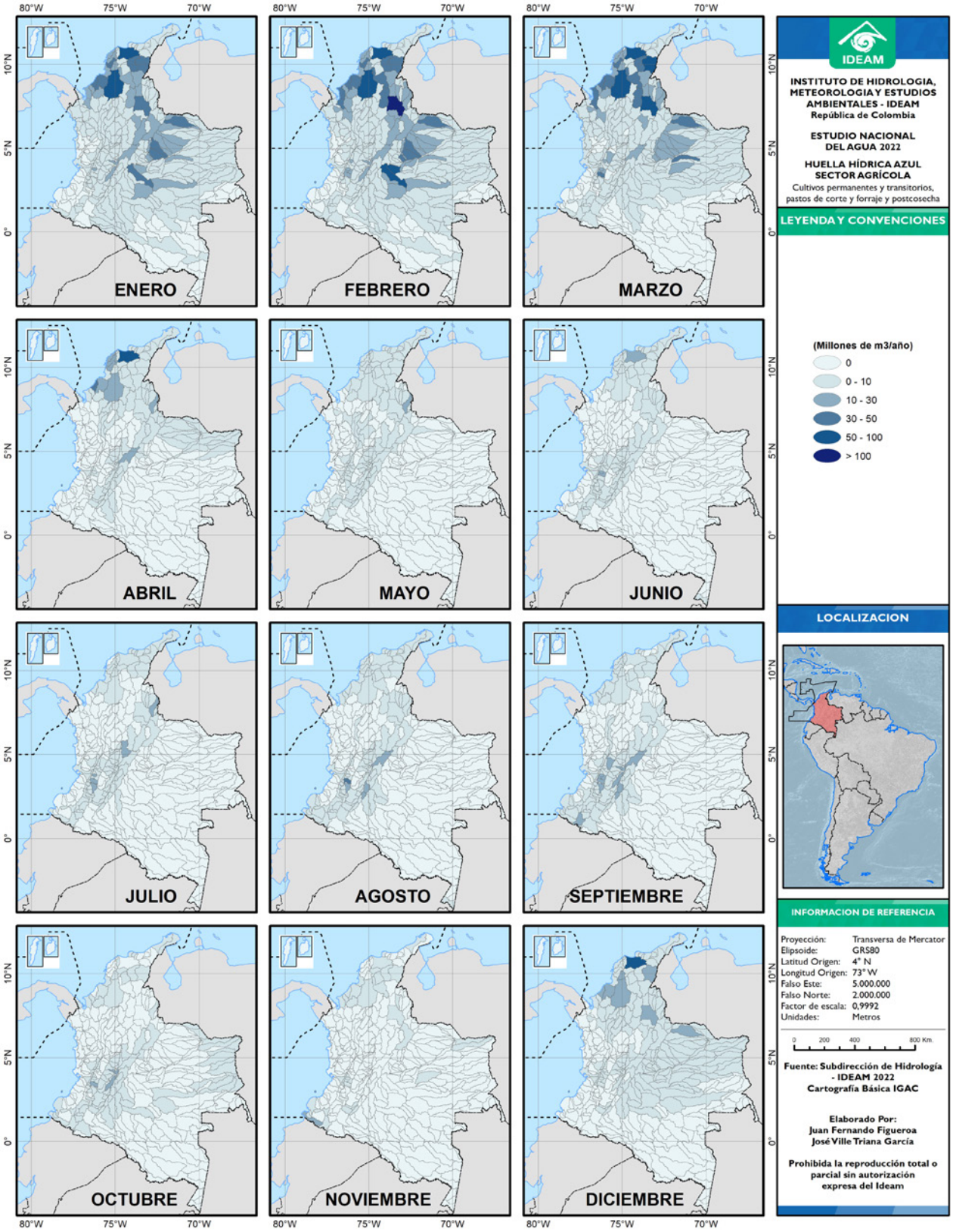



Figura 174. Mapa de distribución temporal de la huella hídrica azul en Colombia.

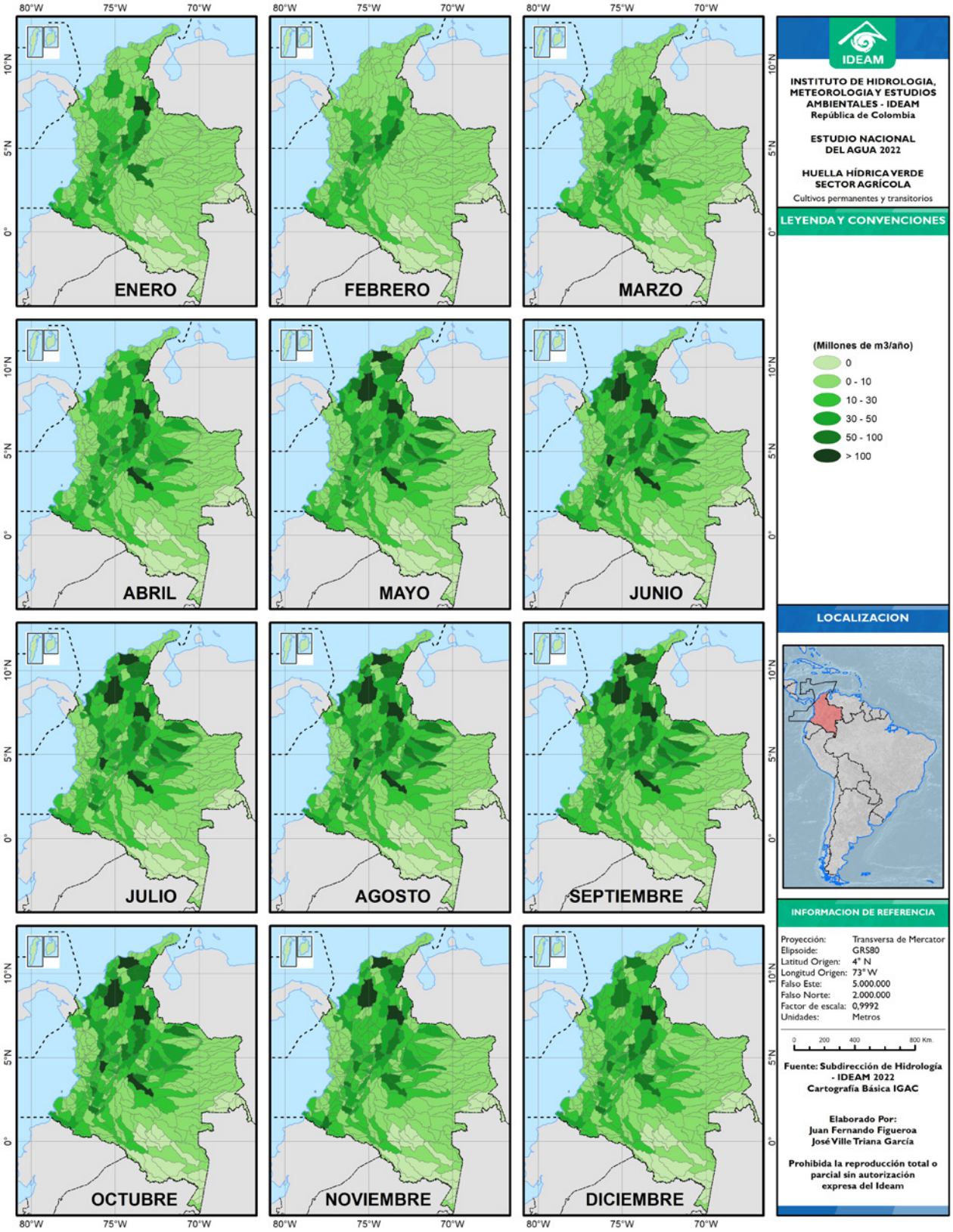



Figura 175. Mapa de distribución temporal de la huella hídrica verde en Colombia.

## Sector pecuario y sacrificio

Para el sector pecuario y de sacrificio, se parte por mencionar algunos aspectos metodológicos que introducen cambios metodológicos respecto al ENA 2018 (Ideam, 2019) y que deben ser considerados para el análisis de los resultados.

- Se consideraron modificaciones en los módulos de uso de agua para la estimación de la demanda en cerdos. Se utiliza como fuente de información sobre agua que consume la producción de cerdos por etapas (empresa Solla) que es muy similar al usado en 2018. Sin embargo, el módulo de uso de hembras de reemplazo pasa de 18 l/animal por día a 13,5 l/animal por día. En el caso de los bovinos, el uso de agua se reduce, pues la información ya no tiene la distribución por tipo de ganadería, lo cual no permite hacer la diferenciación entre uso de agua para hato lechero y hato doble propósito.

- Se realizó la corrección del factor de uso de agua en sacrificio; y la estimación de uso de agua en sacrificio se basó en la distribución de las plantas de sacrificio del país aprobadas por el Invima y por una base de datos de proveedores del Instituto Colombiano de Bienestar Familiar (ICBF, 2022).

- Para el cálculo de poscosecha de café, se corrigió el factor utilizado para calcular el uso de agua de café verde equivalente a café pergamino seco.

La fuente de información para la actualización de la demanda de agua en el sector es el Censo Pecuario Nacional 2020, elaborado por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). Para el cálculo de la demanda asociada con el sacrificio se usaron los datos de la Encuesta de Sacrificio de Ganado (ESAG) del DANE, 2020.

El dato de demanda hídrica del sector pecuario incluye abrevaderos, alojamiento y sacrificio para bovinos, bufalinos, porcinos, caprinos, ovinos y equinos. El uso de agua por cada especie pecuaria se ilustra en la Tabla 55.

Tabla 55. Participación de los tipos de ganado en el uso de agua del sector pecuario (2016 y 2020).

| | 2016 | 2020 |
|---|---|---|
| **Pecuario** | **100,0 %** | **100,0 %** |
| Bovinos | 83,8 % | 79,3 % |
| Avícola | 12,9 % | 14,5 % |
| Porcinos | 3,3 % | 3,4 % |
| Bufalinos | - | 0,5 % |
| Equinos | - | 1,9 % |
| Caprinos | - | 0,1 % |
| Ovinos | - | 0,2 % |
| **Sacrificio** | **100,0 %** | **100,0 %** |
| Bovinos (incluye búfalos) | 8,2 % | 5,4 % |
| Porcinos | 5,8 % | 4,8 % |
| Avícola | 86,1 % | 88,5 % |
| Bufalinos | - | 0,0 % |
| Ovinos | - | 0,8 % |
| Caprinos | - | 0,5 % |

En el año 2020, la estructura no cambia en relación con 2016. En su orden, el uso de agua es más alto en los bovinos, cuyo porcentaje está cerca del 80 %; le siguen la actividad avícola y los porcinos.

En cuanto al uso de agua en el sacrificio, el mayor lo hace el procesamiento de las aves, con un uso por encima del 85 % del total de uso de agua del sector. El sacrificio de bovinos y porcinos son los usos de agua que siguen en su orden. La actividad pecuaria fue una de las más dinámicas en 2020 (Minagricultura, 2021), dada la situación de pandemia con niveles de uso de agua muy similares a 2016.

El análisis por SZH, como se muestra en la Figura 176, permite la visualización decreciente de las veinte SZH con mayor valor del uso del agua (demanda hídrica y huella hídrica azul) para el sector pecuario.

Estas veinte subzonas abarcan el 38 % de la demanda hídrica de la actividad, equivalentes a 580 millones de $m^3$.

En la Figura 177 se presenta la demanda hídrica del sector pecuario por departamento. Los departamentos de Antioquia, Santander, Cundinamarca, Meta, Córdoba, Caquetá y Casanare concentran el 54 % del uso de agua para este sector.

La huella hídrica azul para el sector pecuario concentra el 40 % del volumen de agua consumido en los siguientes cinco departamentos: Antioquia, 12 %; Cundinamarca, 8 %; Santander, 8 %; Meta, 7 %, y Córdoba, 6 %. El dato de uso de agua del sector pecuario incluye el uso de agua en abrevaderos, alojamiento y sacrificio para bovinos, bufalinos, porcinos, caprinos, ovinos y equinos.

**Usos de agua: demanda hídrica y huella hídrica azul, sector pecuario por SZH (millones de $m^3$ /año)**

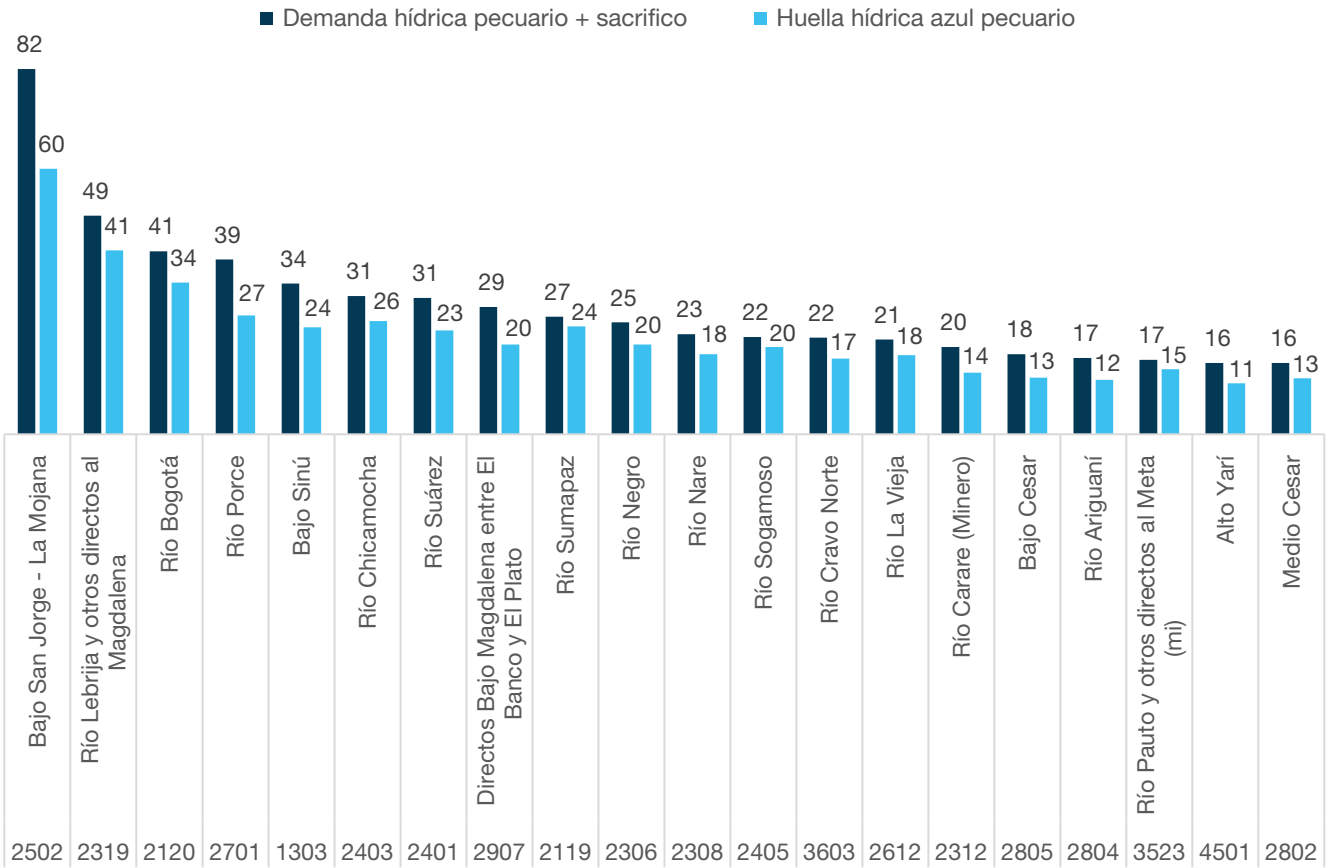



Figura 176. Usos de agua (demanda hídrica y huella hídrica azul), sector pecuario por SZH.

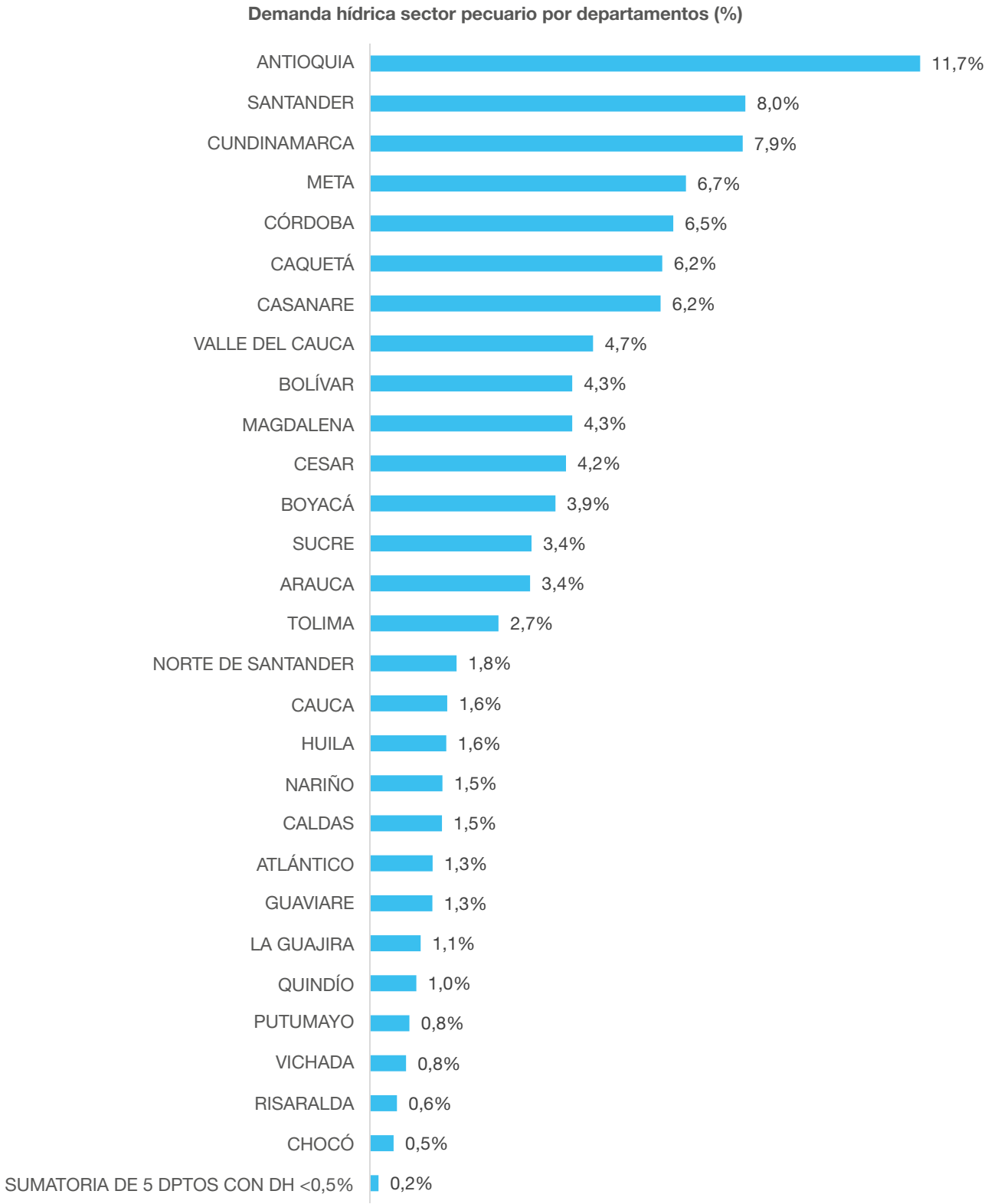



Figura 177. Demanda hídrica sector pecuario por departamento.

## Sector piscicultura

Para el sector piscícola, se examinó el uso de agua requerido para la producción de tilapia, trucha, cachama y otros. Se presentan a continuación los principales resultados consolidados a nivel territorial.

La fuente para la espacialización de la información es el Sistema de Información del Servicio Estadístico Pesquero Colombiano (Sepec), el cual es la herramienta principal de la Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca (Aunap); el Censo de Infraestructura y los datos de producción 2020 corresponden al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.

La Figura 178 muestra, en orden decreciente, las veinte SZH con mayor valor del uso del agua (demanda hídrica y huella hídrica azul) para el sector piscícola; y en la Figura 179 se muestra la distribución de la demanda hídrica de este sector por departamento.

**Usos de agua: demanda hídrica y huella hídrica azul, sector piscícola por SZH (millones m³ /año)**

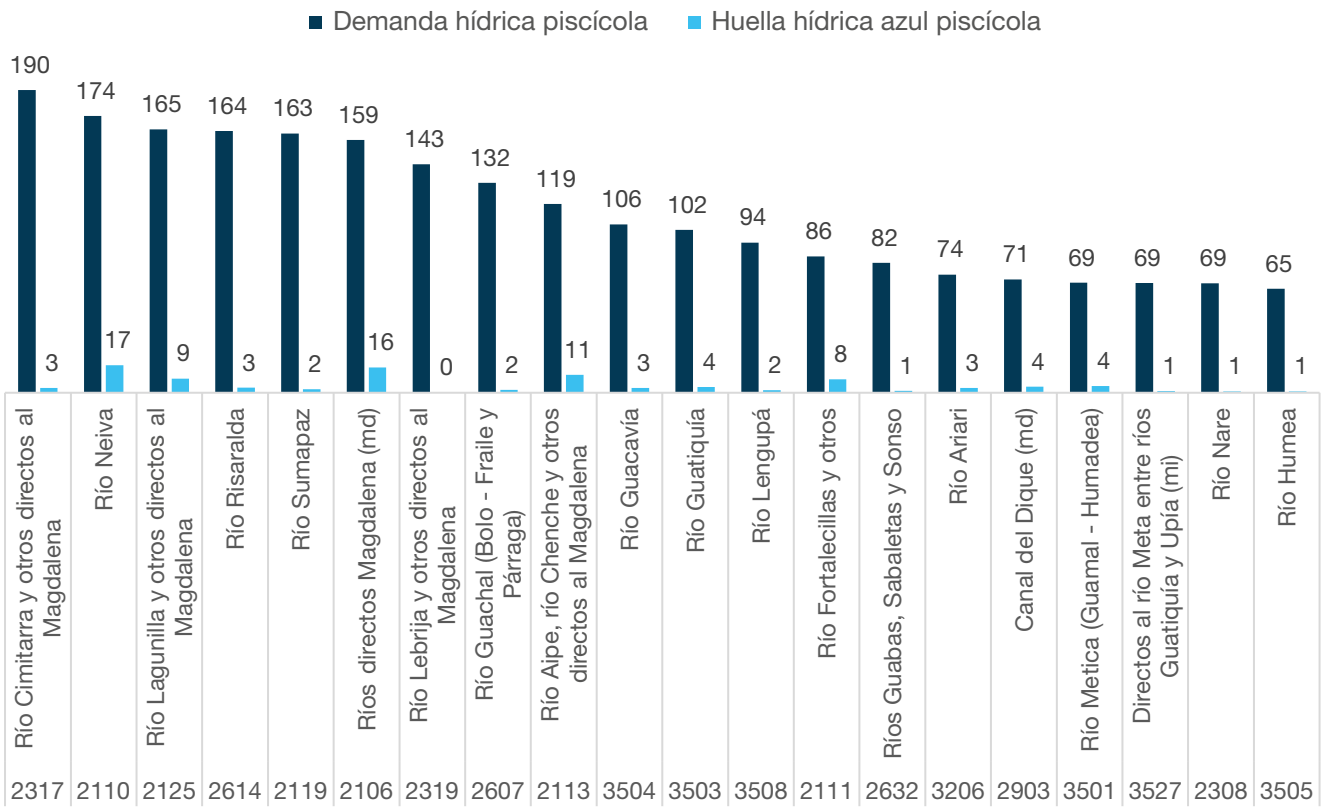



Figura 178. Usos de agua (demanda hídrica y huella hídrica azul) del sector piscícola por SZH.

El 58 % de la demanda de agua del sector piscícola se distribuye en las primeras veinte subzonas hidrográficas. Estas subzonas abarcan 2295 millones de m³. El incremento en el uso de agua se debió a un aumento de la producción de todas las especies; la mayor producción de tilapia en 2020 en relación con el 2019 se tradujo en un incremento del 65 % en el volumen vendido, con un total de 7024 toneladas dirigidas principalmente al mercado exterior.

Respecto a la distribución departamental, el 53,3 % del uso de agua en piscicultura (tilapia, trucha, cachama y otros) se distribuye entre Huila, Antioquia, Cundinamarca, Meta y Valle del Cauca. Estos de-

partamentos, junto con Tolima y Boyacá, alcanzan el 68 % del uso de agua en el sector. El 69 % de la huella hídrica azul del sector piscícola se concentra en los departamentos de Huila, Tolima, Meta, Cundinamarca y Antioquia. Los dos primeros suman el 50 %.

La producción piscícola se realiza principalmente en el Huila. Tradicionalmente, la mayor producción de trucha está en los departamentos de Antioquia, Boyacá, Nariño y Cundinamarca. El Meta ha tenido un aumento de su producción, pues no solo produce tilapia, sino que combina con especies nativas, como la cachama.

**Demanda hídrica sector piscícola por departamentos (%)**

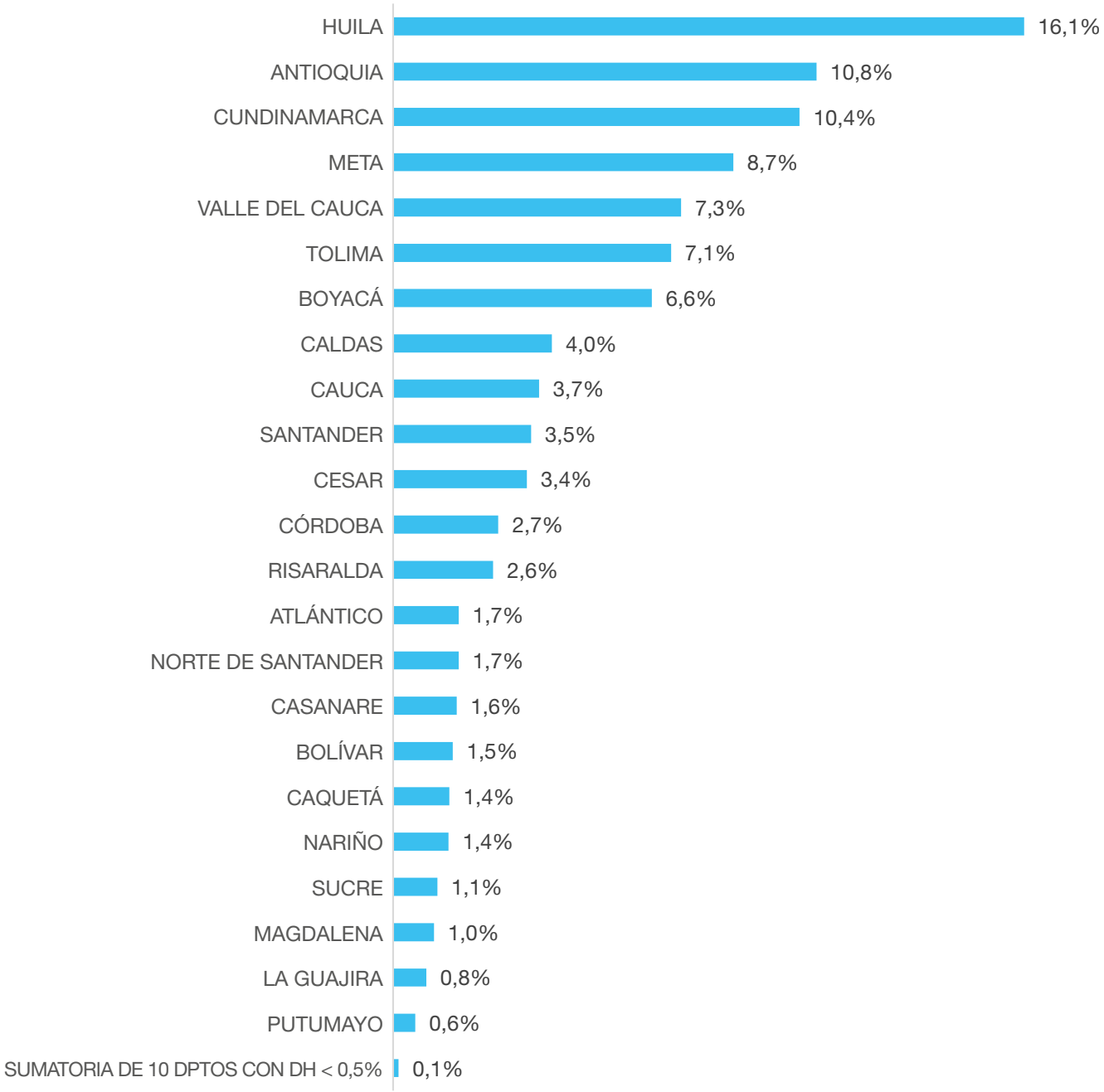



Figura 179. Demanda hídrica sector piscícola por departamento.

## Sector industria

Para el sector industria, se analiza el uso de agua requerido para la producción manufacturera a nivel nacional. Como fuentes de información se utilizaron el Registro Único Ambiental (RUA) y el SIRH, parte del Sistema de información Ambiental que está a cargo del Ideam. De igual manera, se consultó la Encuesta Anual Manufacturera del DANE para el año 2020. Se presentan a continuación los principales resultados consolidados a escala territorial.

La Figura 180 permite la visualización decreciente de las veinte SZH con mayor valor del uso del agua (demanda hídrica y huella hídrica azul) para el sector industria; y en la Figura 181, se muestra la distribución de la demanda hídrica del sector por departamento.

El 90 % del uso total de agua en industria se concentra en estas veinte subzonas hidrográficas. Las tres primeras (Río Porce, Río Bogotá y Directos al río Magdalena entre Calamar y desembocadura) reparten su participación en 16 %, 14 % y 9 %, con respecto al total nacional.

Los primeros cinco departamentos suman el 77 % de la demanda hídrica industrial. Es posible que haya subregistro en la fuente de información para Bogotá y que en algunas de ellas se presenten registros de agua concesionada en lugar del agua realmente usada en la actividad.

**Usos de agua: demanda hídrica y huella hídrica azul, sector industria por SZH (millones m³ /año)**

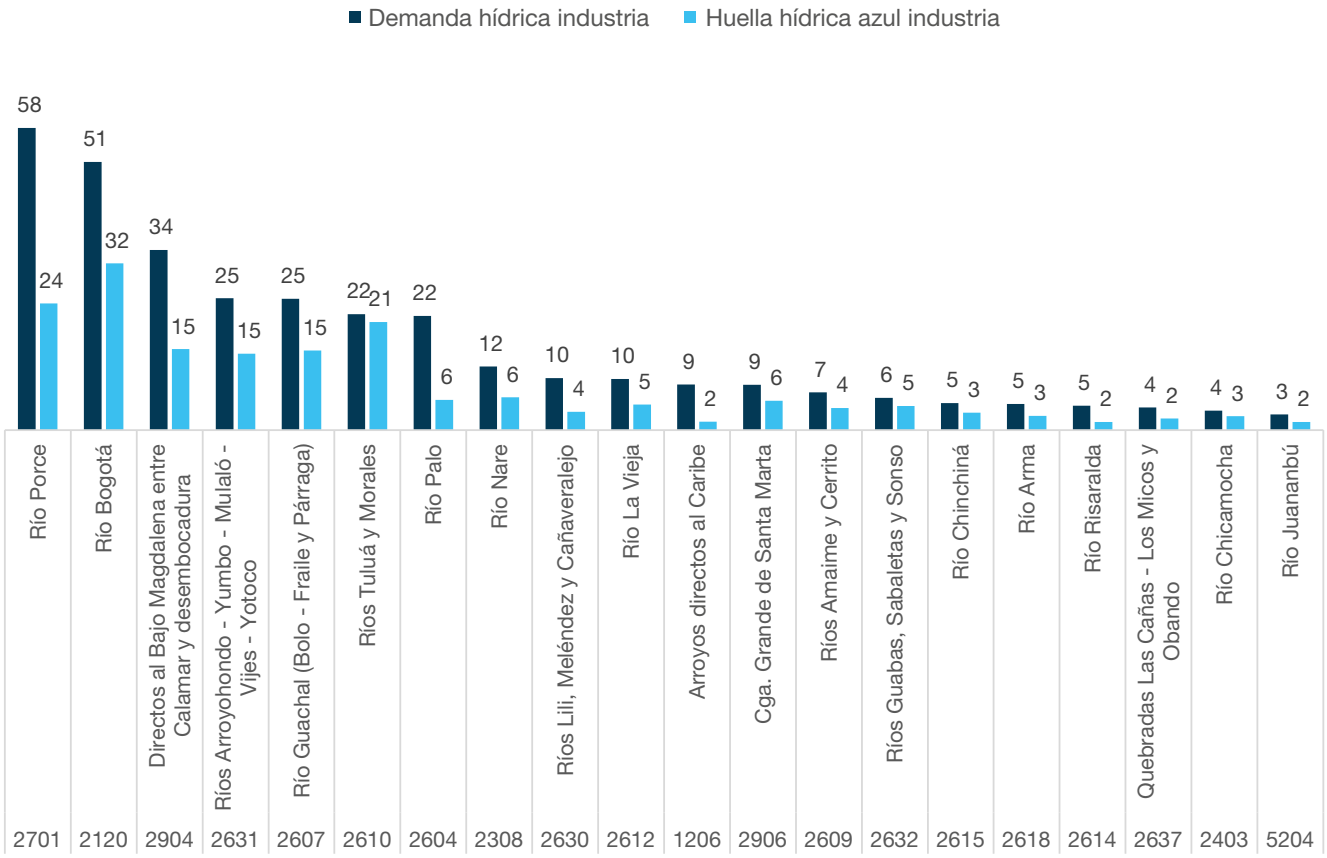



Figura 180. Usos de agua (demanda hídrica y huella hídrica azul), sector industria por SZH.

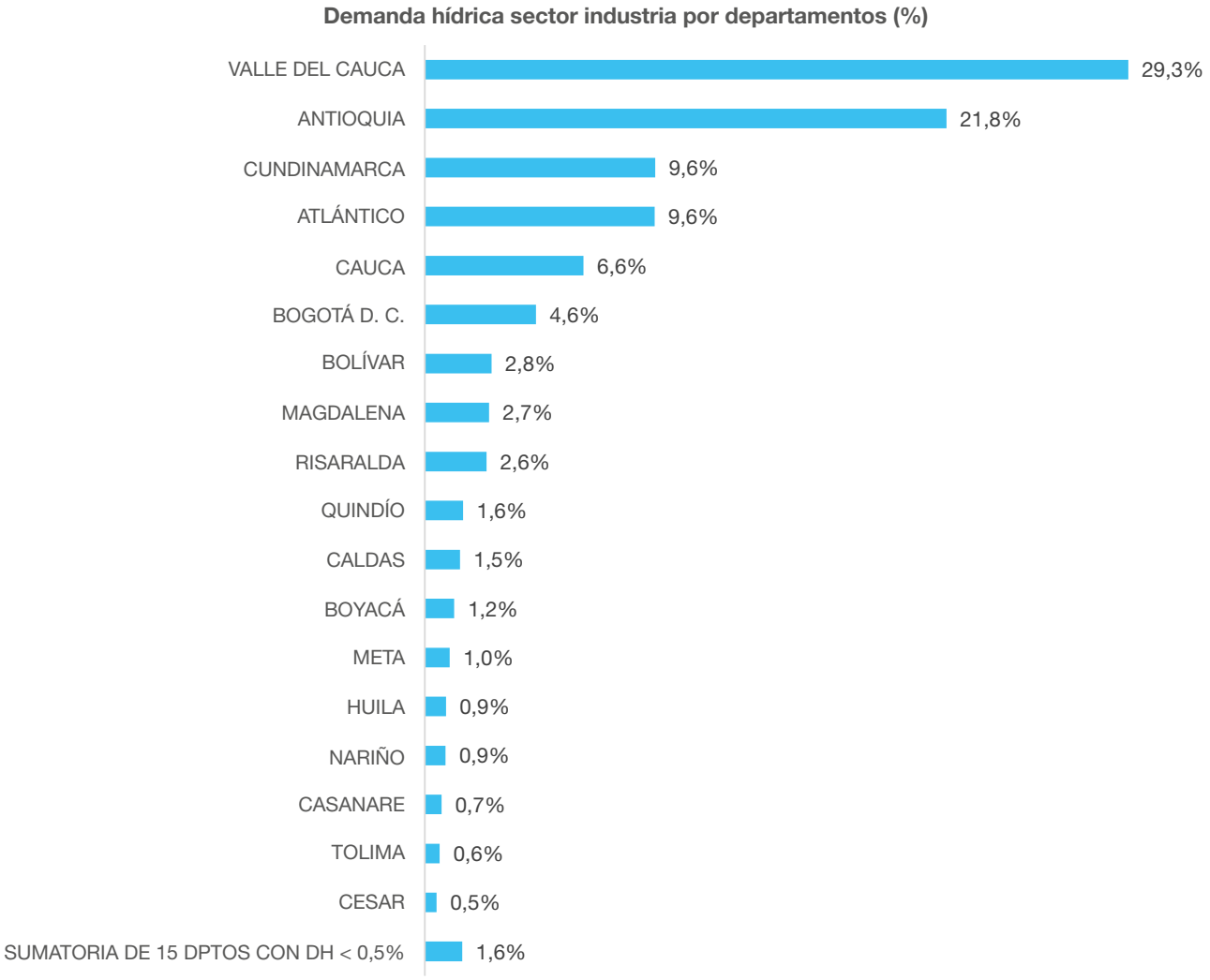



Figura 181. Demanda hídrica sector industria por departamento.

## Sector hidrocarburos

En el sector de hidrocarburos, se analiza el uso de agua requerido para la producción de petróleo crudo y las refinerías.

La información utilizada para los estimativos y el análisis combina datos de Ecopetrol, datos suministrados por las operadoras de hidrocarburos del país y los módulos de consumo identificados por la Asociación Colombiana del Petróleo y Gas (ACP). Se presentan a continuación los principales resultados consolidados a nivel territorial.

En la Figura 182 se observa una visualización decreciente de las veinte SZH con mayor valor del uso del agua (demanda hídrica y huella hídrica azul) para el sector hidrocarburos; y en la Figura 183 se presenta la demanda hídrica del sector hidrocarburos por departamentos, en la que se evidencian aquellos con mayor uso de agua.

Las veinte primeras subzonas hidrográficas concentran el 77 % de la demanda de agua del sector; es decir, 339 millones de $m^3$. Estas alcanzan un uso del 57 % del uso total de agua en el país, con 240 millones.

La producción de petróleo en Colombia bajó un 11,8 % en el año 2020 en relación con 2019, con una producción de 882.222 barriles por día (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2022). La demanda de agua estimada es menor en 2020 que en 2016 debido al ajuste de las fuentes de información. La información utilizada combina las fuentes suministradas por las operadoras de hidrocarburos del país y los módulos de consumo identificados por ACP. Se identifican diferencias notables en los registros de las empresas y en las estimaciones.

El uso de agua del sector hidrocarburos se distribuye en los principales departamentos productores de petróleo (Casanare, Meta, Arauca, Santander, Boyacá, Putumayo y Tolima). Estos siete representan el 91 % del uso del agua del sector. La huella hídrica azul para el sector hidrocarburos se distribuye en un 57 % para el departamento de Santander, 9 % para Bolívar, 8 % para Antioquia, 5 % para Casanare y 5 % para Meta. El orden de los departamentos con mayor uso de agua son los mismos en 2016 y 2020.

**Usos de agua: demanda hídrica y huella hídrica azul, sector hidrocarburos por SZH (millones m³ /año)**

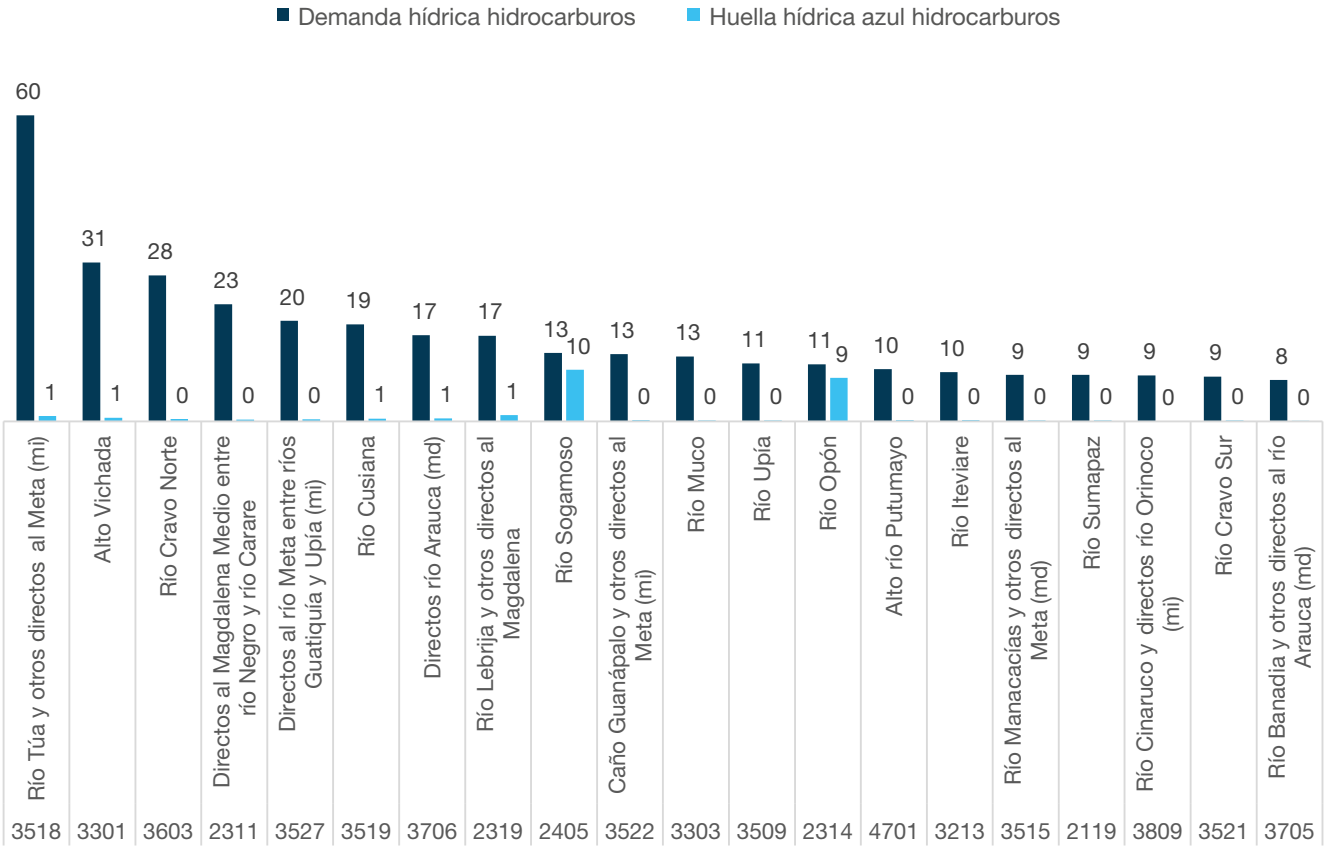



Figura 182. Usos de agua (demanda hídrica y huella hídrica azul), sector hidrocarburos por SZH.

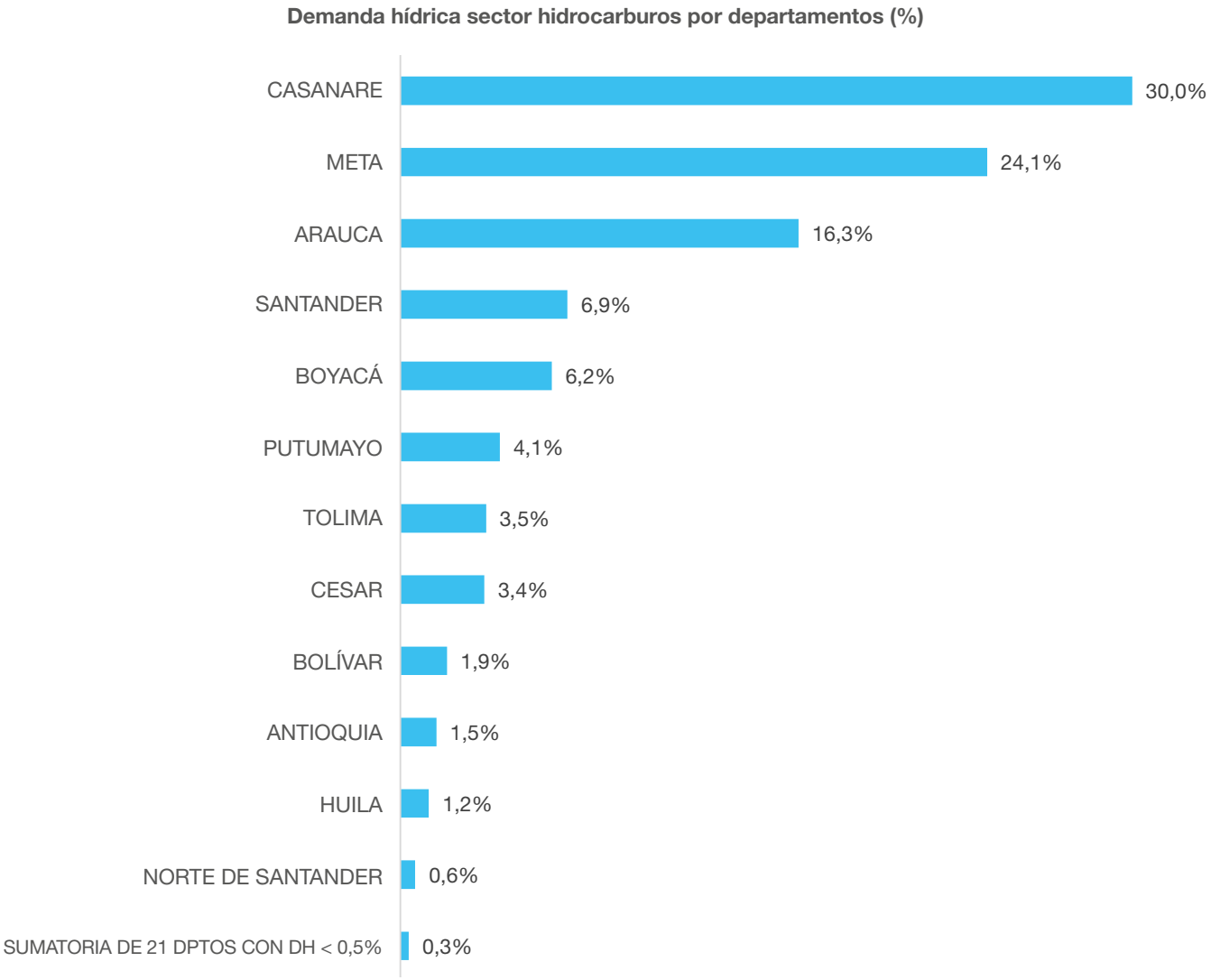



Figura 183. Demanda hídrica del sector hidrocarburos por departamento.

## Sector minería

El sector minero analiza el uso de agua requerido para la explotación principal de carbón y oro a nivel nacional. Las fuentes de información para actualizar el uso de agua en este sector corresponden a las bases de producción minera (por departamento y municipio) de la UPME (Unidad de Planeación Minero-Energética) y la base de títulos mineros de la Agencia Nacional de Minería (ANM), que además

sirven para realizar la espacialización. Se presentan a continuación los principales resultados consolidados en el país.

En la Figura 184 se presentan las SZH con mayor valor del uso del agua (demanda hídrica y huella hídrica azul) para el sector minería; y en la Figura 185, se presenta la demanda hídrica del sector minería por departamento.

Las veinte primeras subzonas demandan el 82 % del agua del sector. Las diez primeras abarcan el 66 % del uso de agua en minería del país. Las tres primeras son: Bajo Nechí, con el 17 %; Medio Cesar, con el 9 %; y Cimitarra y otros directos, con el 8 %.

En la Figura 185 se presenta la demanda hídrica del sector minería por departamento.

Antioquia, Cesar y Chocó concentran el 70 % del uso de agua en minería. La huella hídrica azul se distribuye en un 76 % en el departamento de Cesar, 11 % en Antioquia y 6 % en La Guajira.

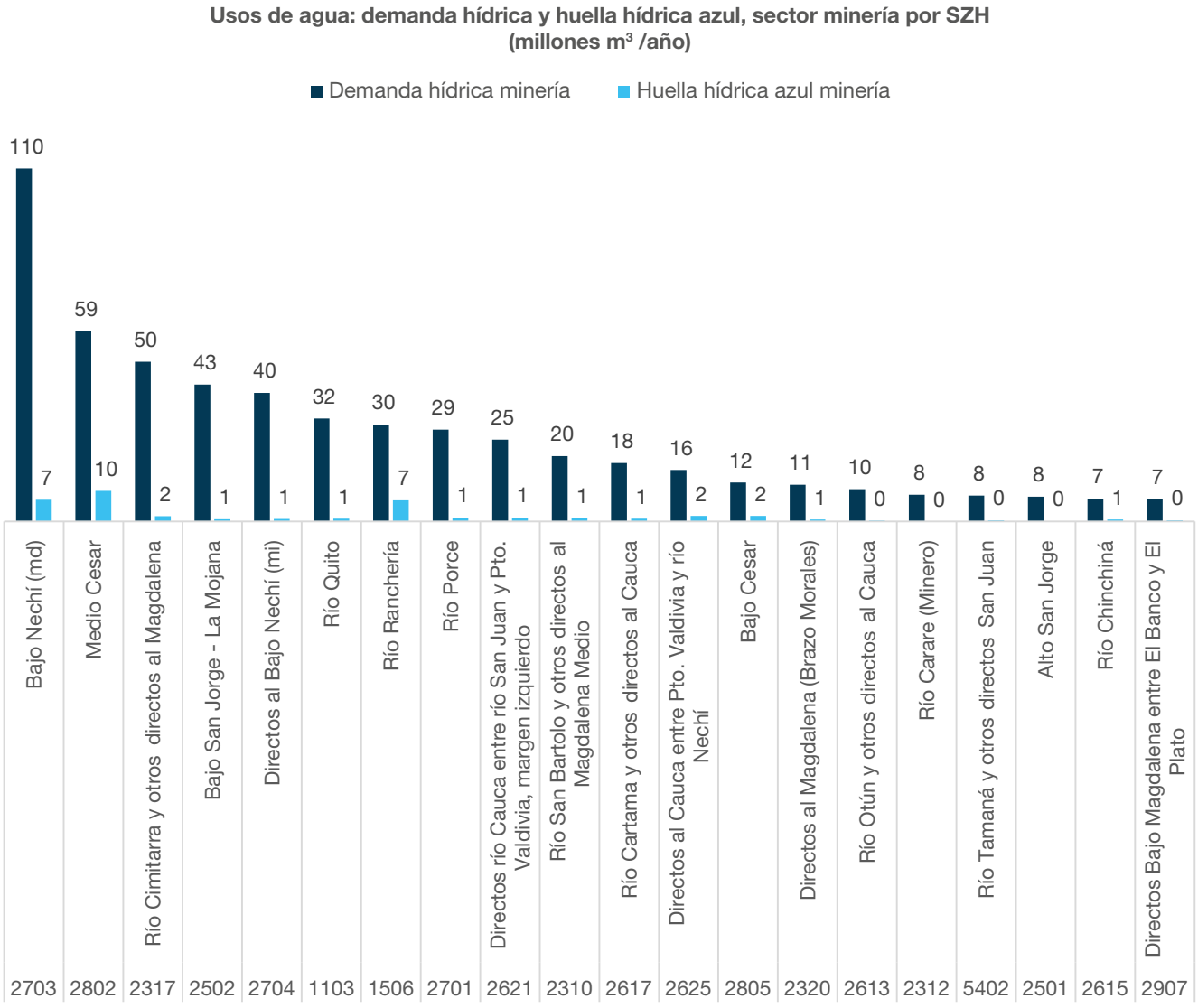



Figura 184. Usos de agua (demanda hídrica y huella hídrica azul) sector minería por SZH.

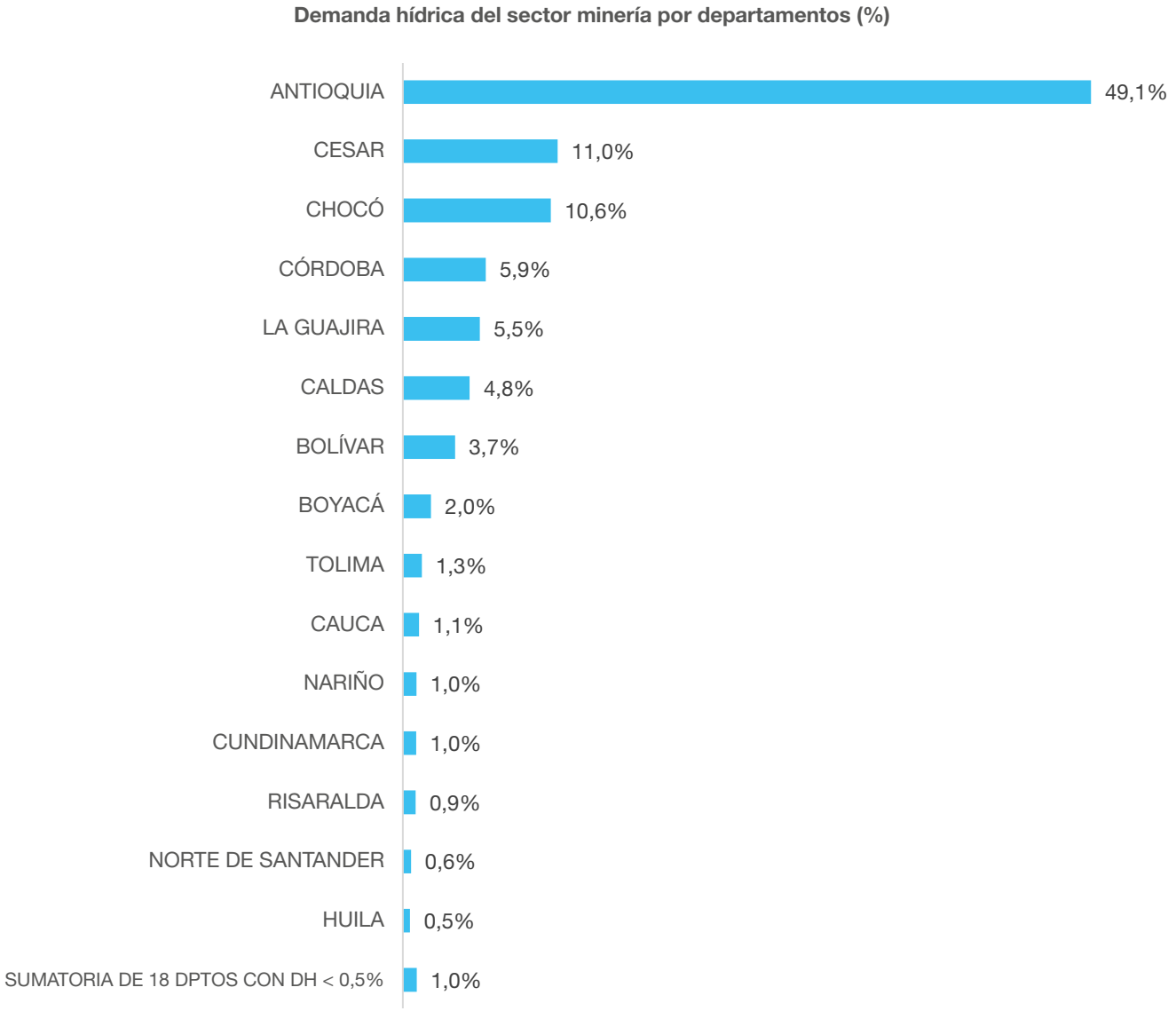



Figura 185. Demanda hídrica sector minería por departamento.

## Sector energía

El sector de generación de energía analiza el uso de agua requerido para la producción de energía hidroeléctrica y termoeléctrica en el país. Se presentan a continuación los principales resultados consolidados a escala territorial.

Las fuentes de información para actualizar las estimaciones a 2020 tienen como base la UPME para hidroenergía; y para los promedios de las variaciones diarias el agua que permanece embalsada durante 2020, las bases reportadas XM. La información de uso de agua para térmicas se basa en los reportes de las operadoras en combinación con registros de generación de XM y módulos de uso de agua.

En la Figura 186 se pueden visualizar las veinte SZH con mayor valor del uso del agua (demanda hídrica y huella hídrica azul) para el sector energía; y la Figura 187 muestra la demanda hídrica del sector energía por departamento.

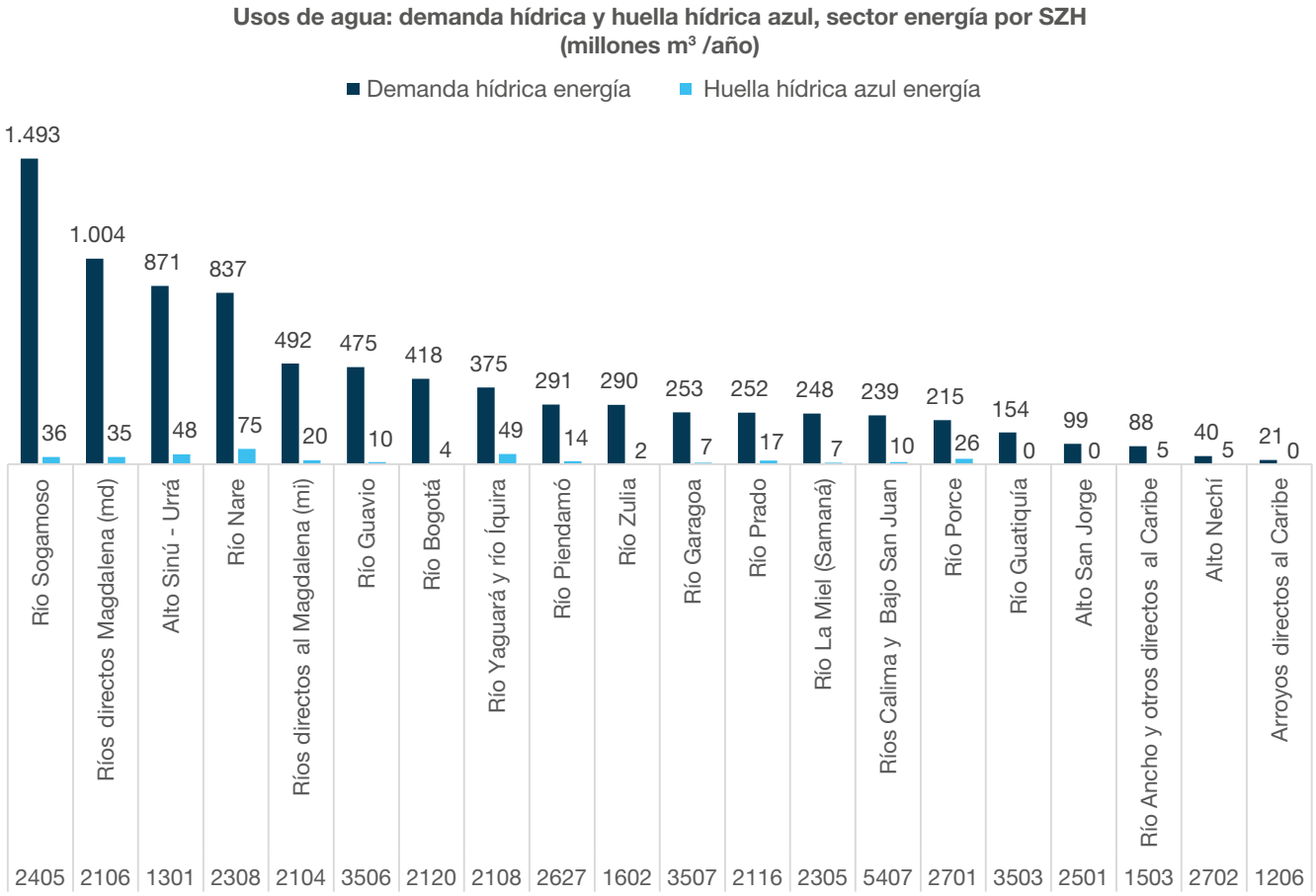



Figura 186. Usos de agua (demanda hídrica y huella hídrica azul) sector energía por SZH.

Este sector agrupa las subzonas con presencia de embalses y térmicas; las veinte primeras abarcan el 99 % del uso de agua del sector y las tres primeras concentran el 41 % de la demanda total.

La información de uso de agua discriminado por tipo de energía evidencia que las térmicas operaron mucho más en 2020. La demanda creciente de energía en la Costa es la razón del mayor uso de las térmicas, También los factores climáticos a finales de 2019 y los primeros meses de 2020 hicieron crecer el uso de agua en relación con 2016. La Asociación Nacional de Empresas Generadoras (Andeg) sostuvo que, desde octubre de 2019, la generación a carbón «ha venido a plena carga, porque básicamente los niveles de los embalses no han tenido muy buena hidrología, particularmente en los meses de enero y febrero, y pues se ha venido generando con carbón y gas natural» (Andeg, 2020).

La cantidad de agua que permanece embalsada durante el año se mantiene estable en comparación con el año 2016, con un comportamiento atribuido al fenómeno de El Niño a finales de 2015 y principios de 2016, el cual redujo a menos del 25 % el nivel del agua acumulada en los embalses de las hidroeléctricas en esos meses. Al final, los embalses cerraron al 74 %. Las reservas hídricas de los embalses se encontraban a inicios de 2020 por debajo del 50 %, de acuerdo con el informe de XM; para agosto, las reservas se acercaban al 32 %. En general, en relación con 2016, el uso de agua en generación eléctrica proveniente de los embalses fue muy similar.

Este sector agrupa el agua que permanece embalsada en promedio diario mensualizado durante el año y el uso de agua para la generación térmica. Los departamentos del Huila, Santander, Antioquia, Cundinamarca y Córdoba representan el 79 % del agua usada para producción de energía del país. La información de hidroenergía cuenta con estadísticas consolidadas en bases de datos para la estimación del agua embalsada, mientras que la información de uso de agua para térmicas se basa en el reporte de las operadoras en combinación con registros de generación y módulos de uso de agua.

Respecto a la huella hídrica azul del sector energético, el 97 % de esta corresponde a embalses y el 3 % restante a termoeléctricas. Por ende, el agua que se pierde corresponde a evaporación directa de agua sobre la superficie de los embalses, por lo que los valores de huella hídrica azul están estrechamente relacionados con la extensión de los espejos de agua y las tasas de evaporación. Los departamentos que más aportan a la huella hídrica azul del sector energético son: Antioquia, Huila, Córdoba, Santander y Tolima; los dos primeros constituyen el 64 %.

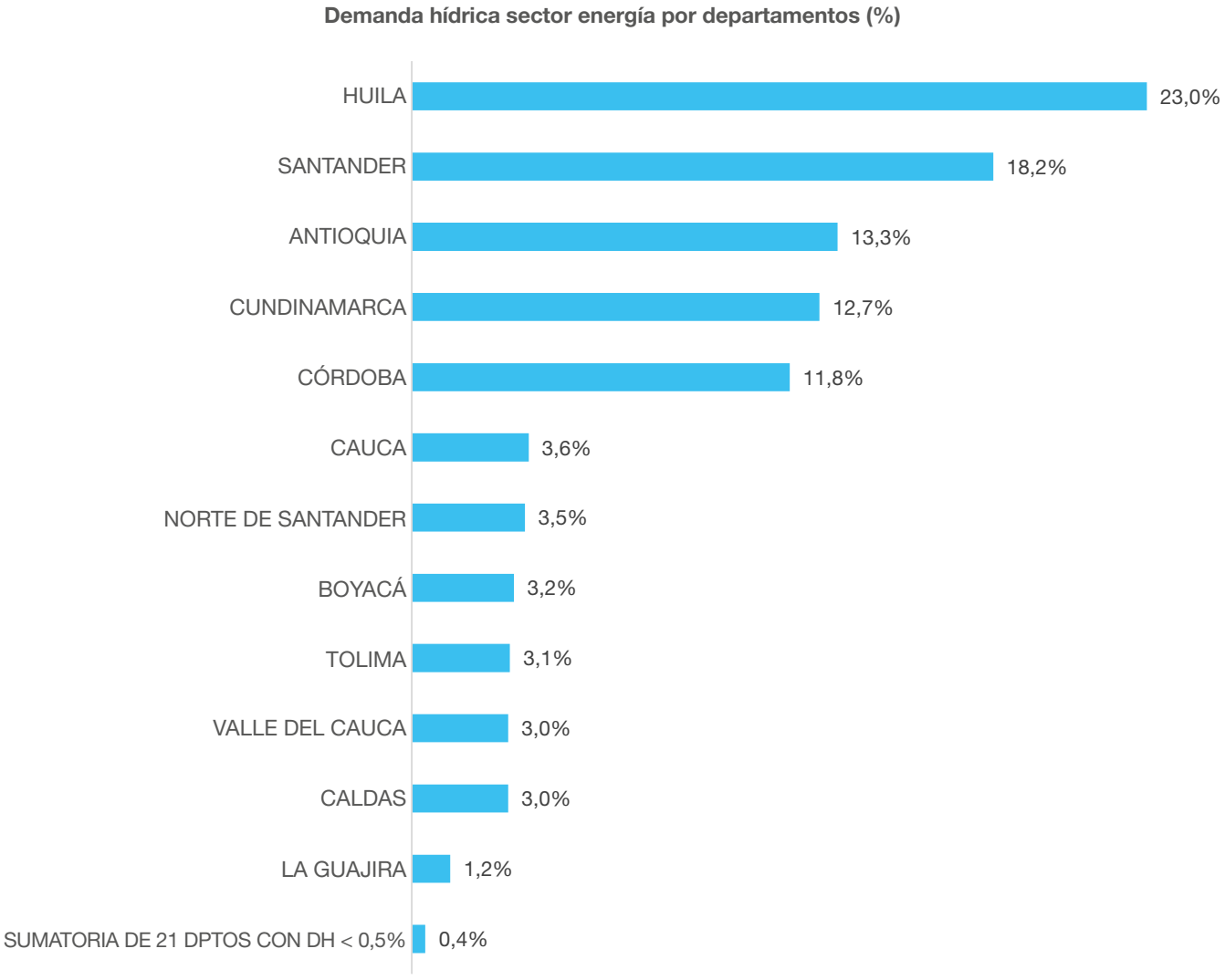



Figura 187. Demanda hídrica sector energía por departamento.

## Sector doméstico

En el sector doméstico, se analiza el uso de agua requerido para el abastecimiento de la población, tanto en el ámbito urbano como en el rural, a nivel nacional. Se utilizan como fuentes de información las bases de datos de la Superintendencia de Servicios Públicos sobre el consumo de agua facturado para 2020 y el Censo Nacional de Población de 2018 del DANE. Se presentan a continuación los principales resultados consolidados a escala territorial.

La Figura 188 posibilita la visualización decreciente de las veinte SZH con mayor valor del uso del agua (demanda hídrica y huella hídrica azul) para el sector doméstico; y la Figura 189 muestra el uso de agua doméstico en 2020 y la población para ese mismo año en los principales núcleos poblacionales en Colombia.

La demanda de agua para uso doméstico que agrupan las veinte primeras subzonas hidrográficas representa el 61 % del total nacional. Las primeras tres subzonas hidrográficas con el mayor uso de agua doméstica son la del Río Bogotá, por la presencia del área metropolitana de Bogotá; y la de Río Porce y río Medellín, por la presencia de Medellín y su área metropolitana, con el 21 %.

**Usos del agua: demanda hídrica y huella hídrica azul, sector doméstico por SZH (millones m³ /año)**

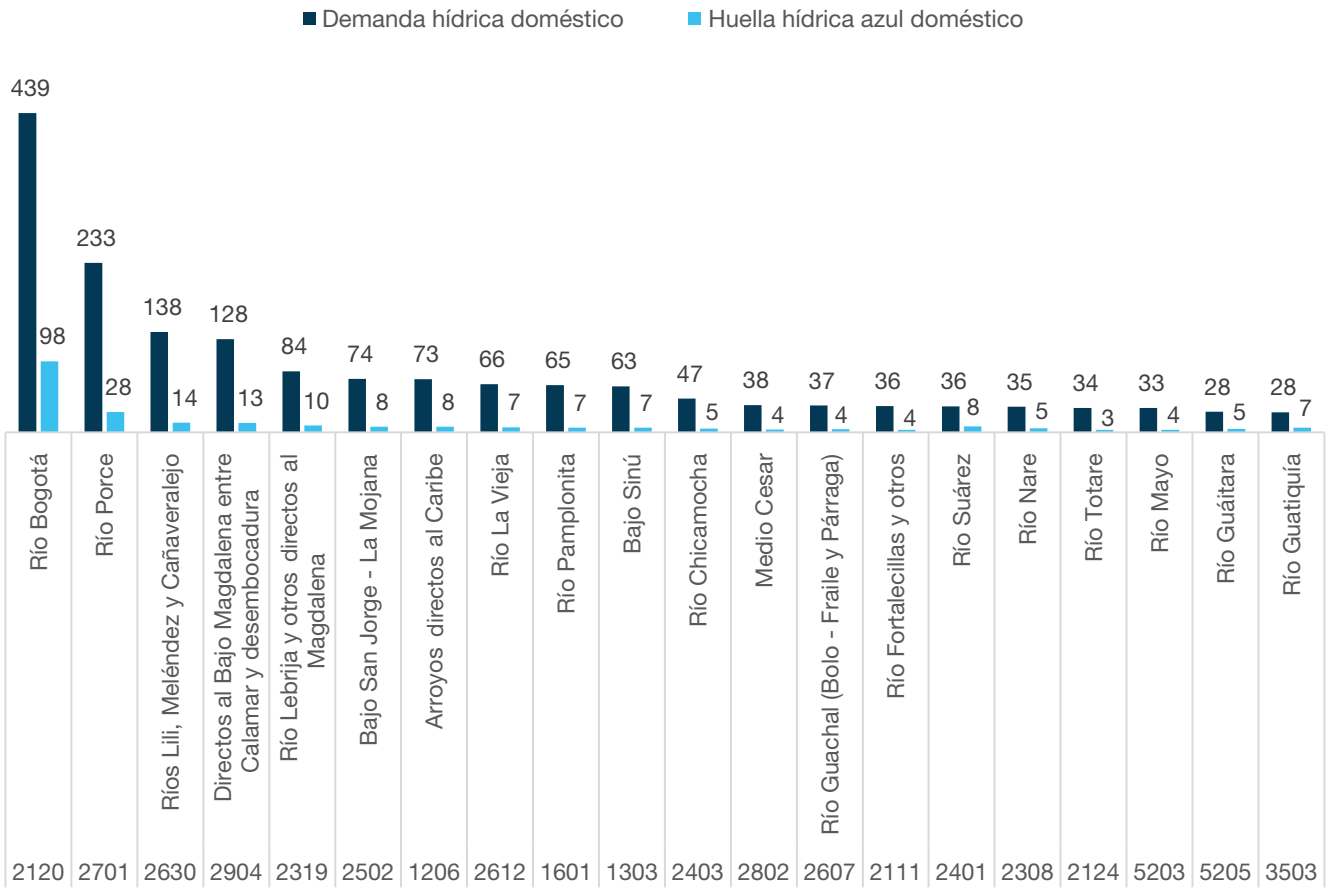



Figura 188. Usos de agua (demanda hídrica y huella hídrica azul), sector doméstico por SZH.

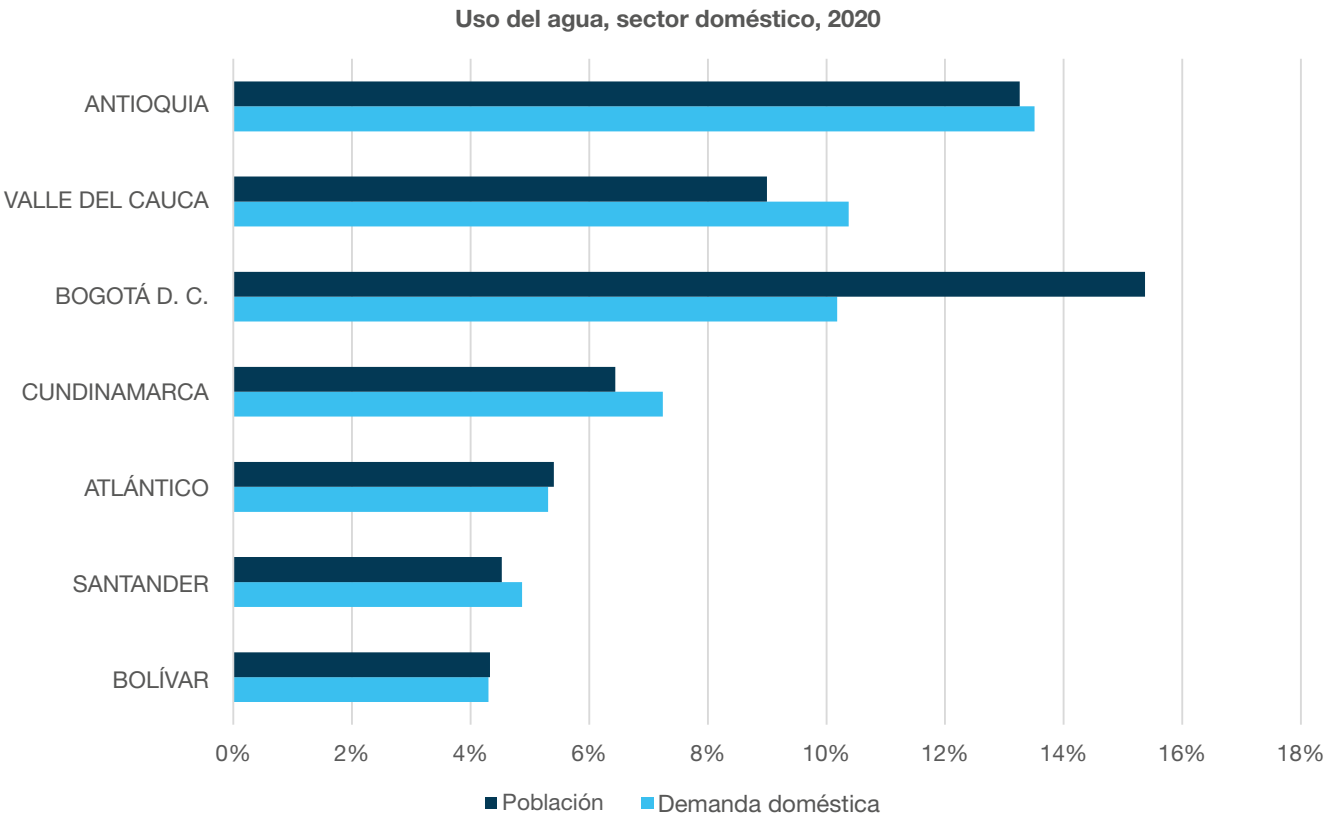



Figura 189. Comparación de uso de agua sector doméstico y población, 2020.

De acuerdo con la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, entre otros factores, los programas de uso eficiente del agua han empezado a tener efecto en las empresas, y esto se evidencia en los consumos de agua en las grandes ciudades como Medellín, Cali y Bogotá. Es así como, en los últimos 20 años, Medellín ha reducido el consumo de 20 $m^3$ a 14 $m^3$ por hogar, por año. En Bogotá, el nivel de consumo por habitante es de 80 l/día por habitante y en Cali es de 136 litros por habitante por día.

Los departamentos que tienen un mayor uso de agua (Figura 190) son, en su orden: Antioquia, Valle del Cauca, Bogotá, Cundinamarca, Atlántico, Santander y Bolívar; estos siete abarcan el 56 % del uso doméstico. Cabe resaltar que Bogotá, siendo la ciudad que agrupa la mayor cantidad de población, ocupa un tercer lugar en uso de agua. La fuente de información es robusta y hace parte de una operación estadística certificada por el DANE. Sin embargo, se percibe que no hay un registro continuo y aún hay municipios en los que sus acueductos no reportan datos, dada la no existencia de micromedición.

La huella hídrica azul del sector doméstico se estima mediante un factor constante del 15 % de la demanda, por lo cual, los valores están alineados. Los departamentos con mayor participación en la huella hídrica nuevamente están influenciados por el tamaño de la población y son, en orden descendente: Cundinamarca, Antioquia, Valle del Cauca, Atlántico y Santander. Los tres primeros representan un 49 %.

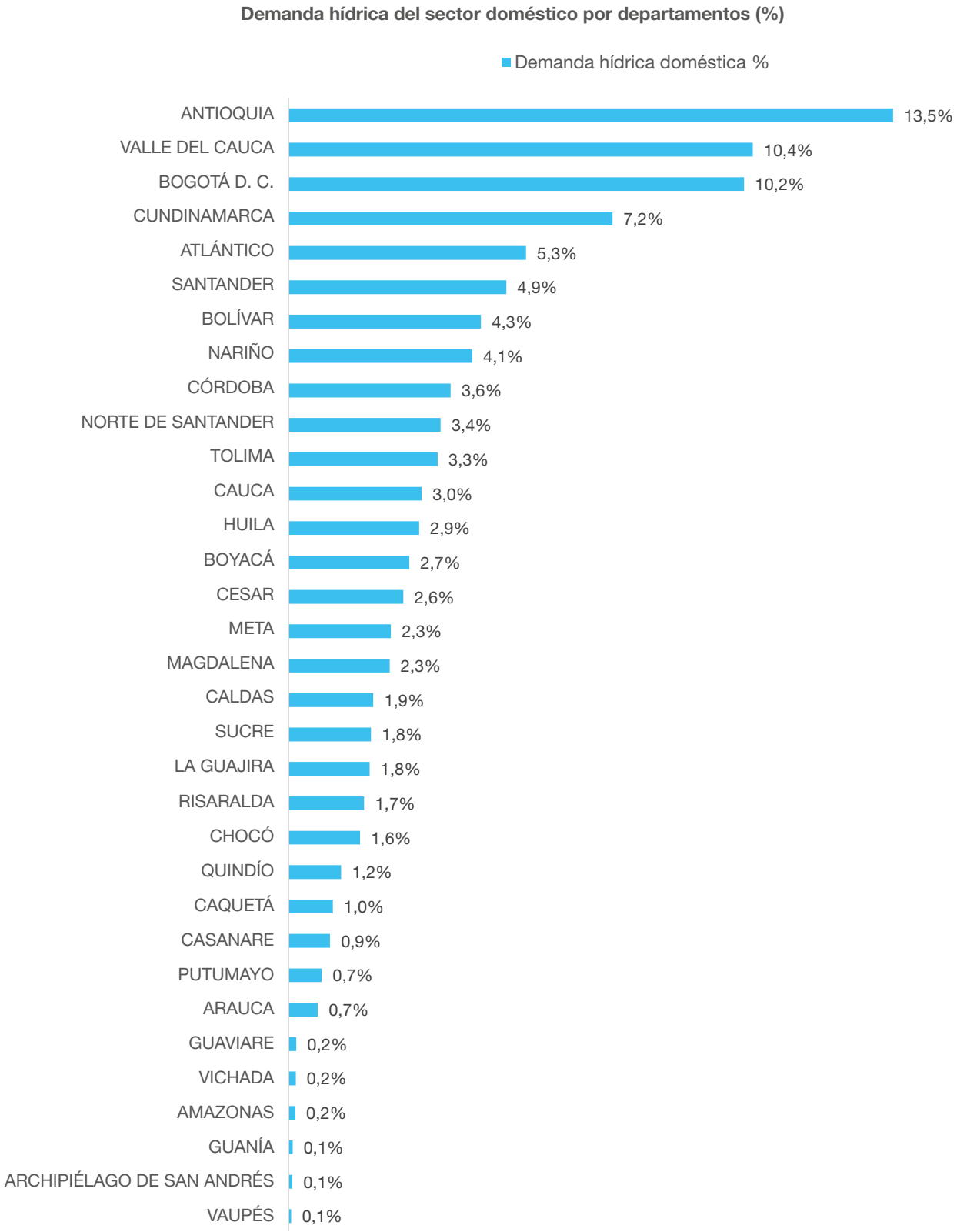



Figura 190. Demanda hídrica sector doméstico por departamento.

## Sector de servicios

El sector servicios analiza el uso de agua requerido para uso oficial y servicios en el ámbito nacional. Se presentan a continuación los principales resultados consolidados a escala territorial.

Al igual que la demanda doméstica, la fuente de información para la actualización de uso de agua en este sector es la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios en la base de consumo de agua facturada para servicios oficial, comercio y especial, año 2020.

La Figura 191 hace posible visualizar las veinte SZH con mayor valor del uso del agua (demanda hídrica y huella hídrica azul) para el sector servicios; y en la Figura 192 se presenta la demanda hídrica del sector servicios por departamento.

**Usos de agua: demanda hídrica y huella hídrica azul, sector servicios por SZH (millones m³ /año)**

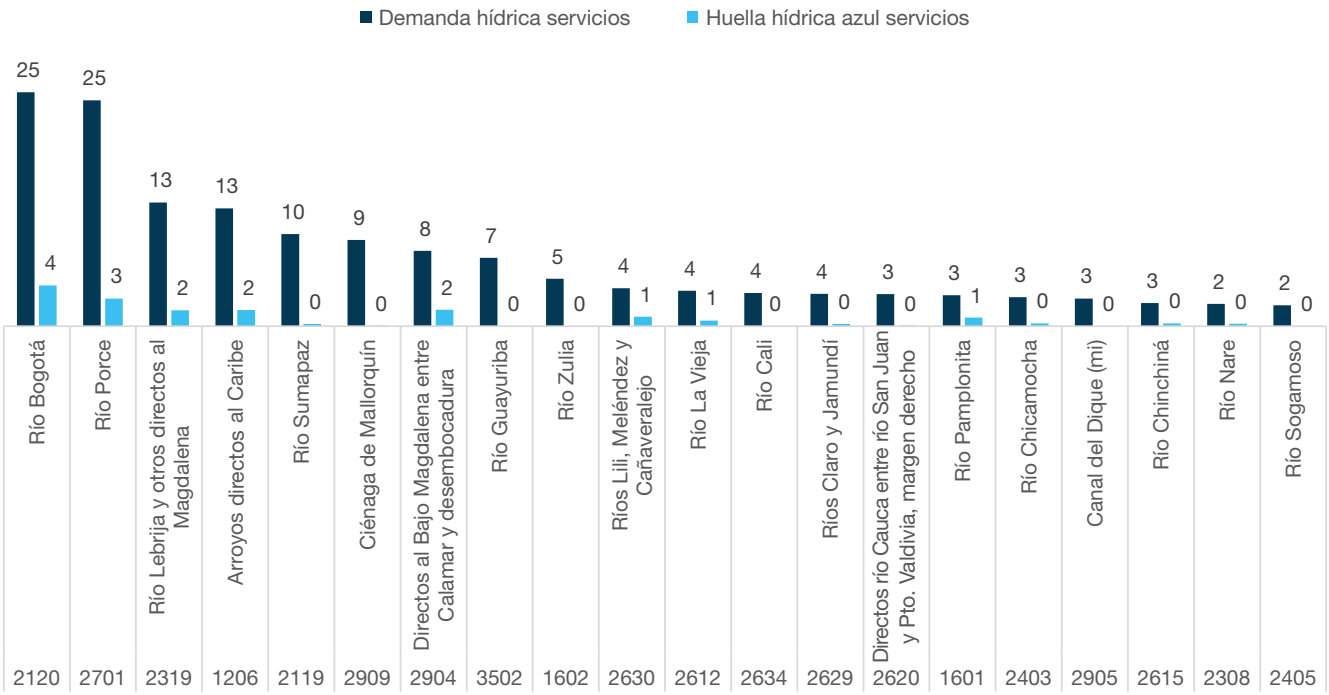



Figura 191. Usos de agua (demanda hídrica y huella hídrica azul) sector servicios por SZH.

El 72 % de la demanda del sector se concentra en veinte subzonas hidrográficas. Las dos primeras agrupan el 24 % del uso; las demás participan con porcentajes de 6 %, 4 % y 2 %, y completan el 57 %.

Los departamentos con mayor uso doméstico son también los de mayor uso de agua en el sector servicios. Sin embargo, el orden es diferente; Antioquia concentra el 16 %, Bogotá el 14 %, sigue Valle del Cauca con 10 %, Santander con 9 %, Atlántico el 9 %, Bolívar un 8 % y Cundinamarca con 6 %. Los primeros cuatro usan el 50 % del agua involucrada en las actividades del sector. Con los tres últimos se alcanza el 73 % del total. La fuente de información es la Superintendencia de Servicios Públicos que recoge el uso de agua en entidades públicas, comercio y otras actividades de servicios privadas. En comparación con el año 2016, la cantidad de agua utilizada en servicios se redujo sustancialmente, factor que se puede atribuir a la desaceleración producida por la pandemia.

Los departamentos con mayor huella hídrica para el sector servicios son nuevamente aquellos que concentran los grandes centros poblados del país: Cundinamarca, 21 %; Antioquia, 16 %; Atlántico, 11 %; Valle del Cauca, 10 %; y Santander, el 7 %. Juntos suman un 66 % de la huella hídrica azul.

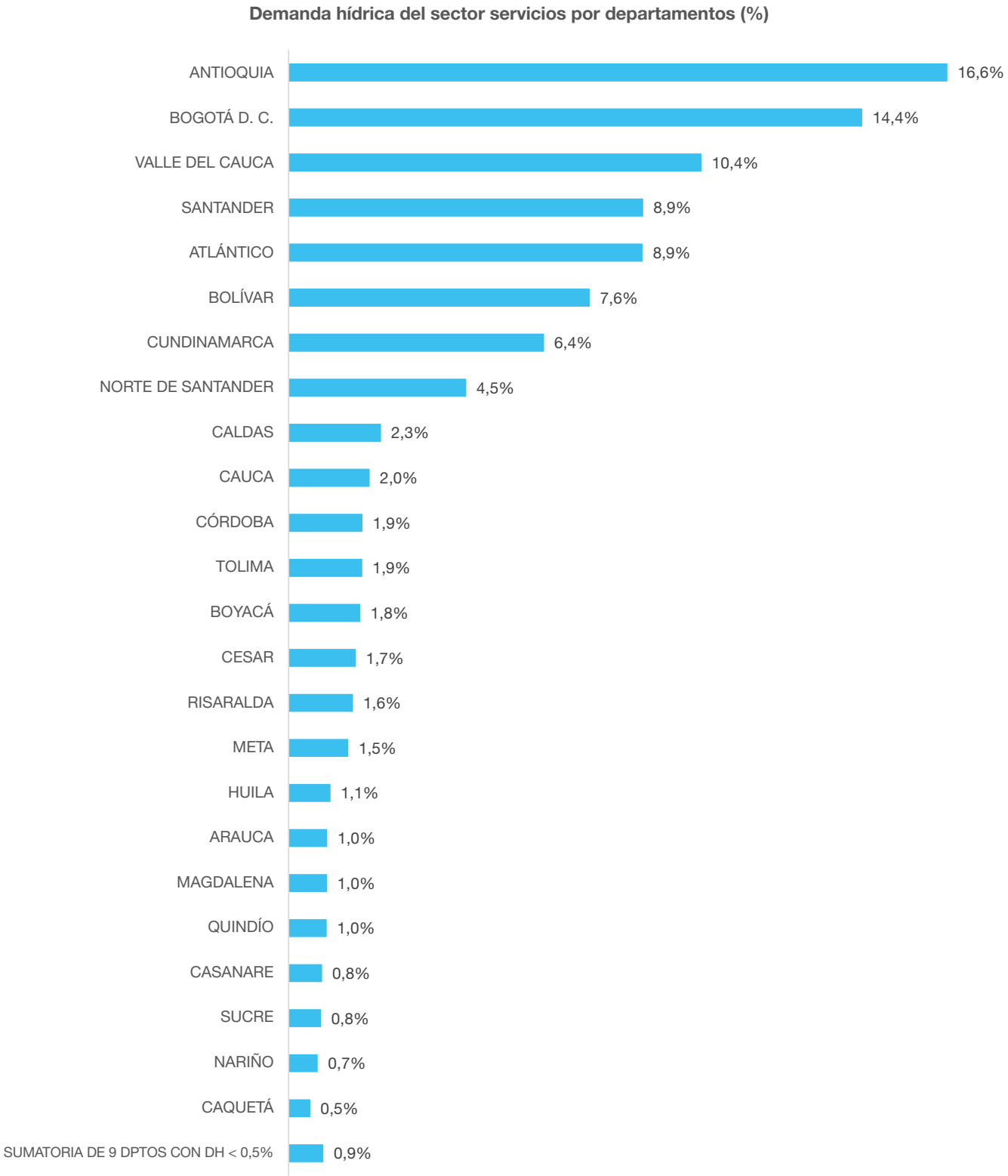



Figura 192. Demanda hídrica sector servicios por departamento.

## 7.3 Indicadores desarrollados a partir del uso del agua

Los indicadores de presión sobre el recurso hídrico son las herramientas que permiten utilizar el resultado consolidado multisectorial de los usos del agua mediante relaciones con variables que determinan el estado de oferta natural disponible de agua en ese mismo territorio; hacen posible identificar los territorios, en este caso, las subzonas hidrográficas donde se ejerce alta presión, lo que genera una situación de potencial conflicto por uso del agua.

Se presentan a continuación los resultados de índice de uso de agua (IUA), índice de agua no retornada a la cuenca (IARC), índice de presión hídrica a los ecosistemas (IPHE) e índice de eficiencia en el uso del agua (IEUA). Los tres primeros muestran relación de uso de agua frente a condición natural de la subzona hidrográfica; el cuarto, una relación entre variables de uso, con base en las definiciones detalladas de los fenómenos que describen, respecto a la extracción de agua y al volumen de no retorno a la fuente de agua.

Los cuatro indicadores se analizan en su dispersión geográfica, presentando los mapas a nivel nacional; los mapas de índice de agua no retornada a la cuenca e índice de eficiencia en el uso del agua se incluyen en este capítulo; y aparte, en el capítulo 11 (Análisis integrado del agua en Colombia) de este mismo documento, se exponen los mapas de índice de uso de agua e índice de presión hídrica a los ecosistemas.

### 7.3.1 Relación entre la demanda hídrica y la oferta disponible (IUA)

El índice de uso de agua (IUA) es el valor numérico que, en una de seis categorías, califica la relación entre la demanda hídrica multisectorial en una subzona hidrográfica en un periodo de tiempo y la oferta hídrica superficial disponible para ese mismo periodo.

El indicador refleja la capacidad que tienen las subzonas hidrográficas para sostener los volúmenes de agua extraídos generados por las actividades antrópicas que se desarrollan en una subzona hidrográfica, entendiendo por demanda hídrica el volumen extraído, sin importar si este retorna total o parcialmente. En caso de que una subzona hidrográfica presente un estado crítico, significa que esta ya agotó su disponibilidad de agua superficial para satisfacer los requerimientos hídricos de las actividades económicas que se desarrollan en dicha subzona; y que, según la información oficial analizada, existen usos que son abastecidos por fuentes no contabilizadas ni reportadas o que hay actividades que tienen requerimientos hídricos que se encuentran insatisfechos, generando reducción de la productividad.

El Estudio Nacional del Agua ENA 2010 (Ideam, 2010) consolida la batería de indicadores de estado, presión y riesgo del recurso hídrico, lo mismo que el índice de uso de agua (IUA) como indicador que sustituye al índice de escasez (IE) que se utilizó en estudios nacionales del agua antes del ENA 2010. El IUA mantiene la formulación matemática y conserva el objetivo relativo de mostrar la relación entre la demanda hídrica (extracción total de agua) y la oferta hídrica disponible (oferta total menos caudal ambiental).

En la Tabla 56, se presentan los rangos de evaluación del IUA que, bajo una convención de colores y rangos de valor, representan la situación estimada para el indicador, resaltando las SZH en estado crítico, muy alto y alto.

Tabla 56. Rangos de evaluación IUA.

| Rango IUA | Categoría |
|---|---|
| IUA < 1 | Muy bajo |
| 1 < IUA < 10 | Bajo |
| 10 < IUA < 20 | Moderado |
| 20 < IUA < 50 | Alto |
| 50 < IUA < 100 | Muy alto |
| IUA > 100 | Crítico |

Los rangos establecidos con sus colores y valoraciones son la convención que se utiliza para todos los gráficos y mapas que hagan referencia a este indicador.

En la Figura 193, se presenta la distribución porcentual de estado de IUA para todas las SZH en Colombia, evaluado el indicador para una condición de año medio en la oferta disponible.

En la Figura 194, se presenta la distribución porcentual de estado de IUA para todas la SZH en Colombia, evaluado el indicador para una condición de año seco en la oferta disponible.

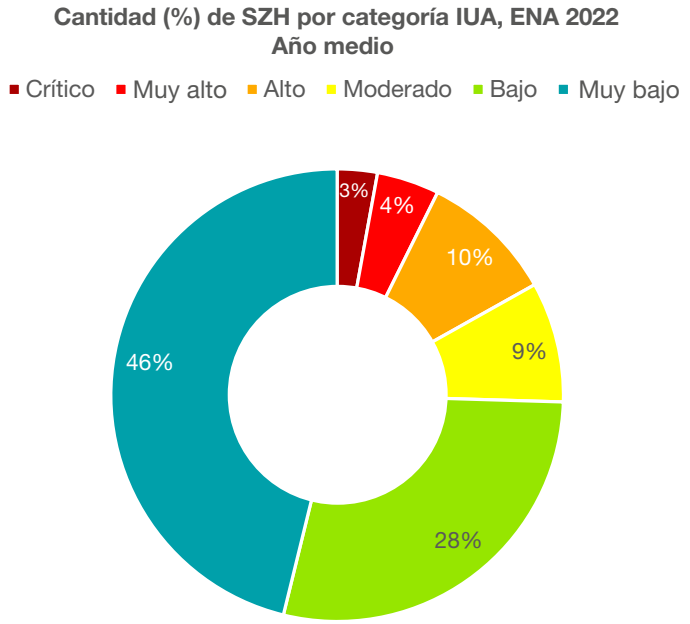



Figura 193. Distribución porcentual de estado de IUA por SZH en Colombia, año medio.

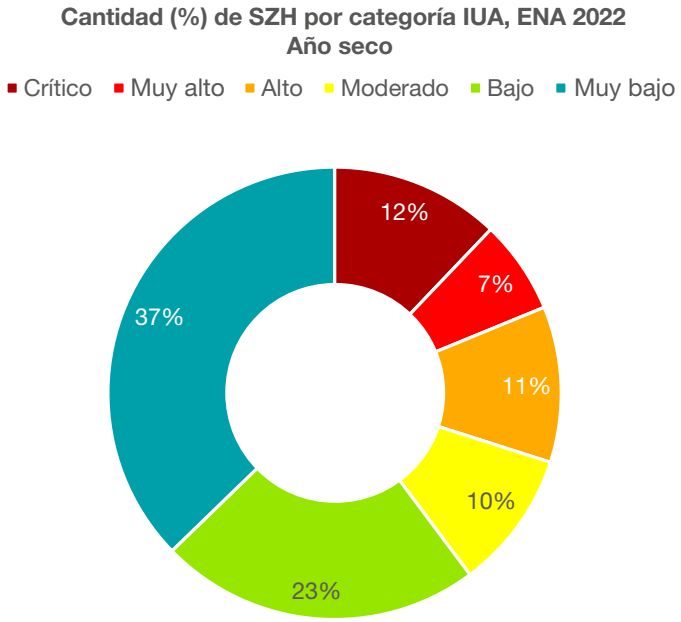



Figura 194. Distribución porcentual de estado de IUA por SZH en Colombia, año seco.

La conclusión de la distribución de estado de IUA para SZH es que la condición de año seco aumenta en un 13 % el número de SZH que están en categorías «crítico», «muy alto» y «alto», pasando de un 17 % de las SZH en condición de año medio a un 30 % de las SZH en condición de año seco.

La Figura 195 ilustra cuál es la incidencia del cambio en la condición hidroclimática para el cambio de estado de IUA en las SZH entre año medio y año seco.

De la gráfica se puede establecer que estos cambios de estado de IUA tienen una clara concentración de SZH en condición de IUA crítica, muy alta, alta o moderada para el AH Magdalena-Cauca; se puede ver cómo, de veintiocho SZH en condición crítica en año seco, en un año medio ese número se reduce a ocho SZH; esto implica que hay veinte SZH en el AH Magdalena-Cauca que tienen una condición determinada por la disponibilidad de agua, mientras las ocho restantes requieren acciones que moderen el uso, dado que aunque tienen mayor disponibilidad, los requerimientos exceden la oferta disponible. La siguiente gráfica (Figura 196) presenta la comparación del IUA por SZH para condición de año seco y año medio, y su categoría respectiva (color asociado según la Tabla 56).

**Número de SZH y cambio de estado de IUA por área hidrográfica para condición de año medio y año seco**

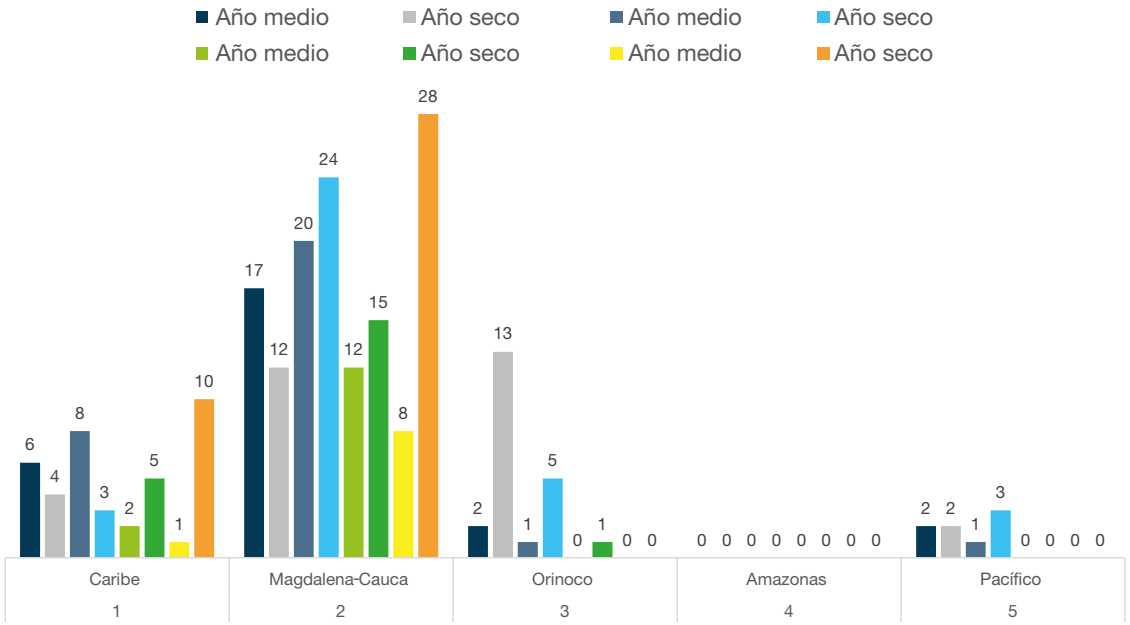



Figura 195. Número de SZH y cambio de estado de IUA por área hidrográfica (AH) para condición de año medio y año seco.

En la Figura 196 se identifican las treinta y ocho SZH que tienen la condición de IUA crítico para la condición hidrológica de año seco, lo que significa la condición de mayor nivel de uso en relación con una menor oferta hídrica disponible; por tanto, la mayor condición de competencia por uso. Solo las nueve primeras SZH mantienen la condición crítica de IUA para una condición hidrológica de año medio; esto significa que dichas nueve SZH tienen una evaluación de IUA crítica que no está siendo condicionada por la condición hidrológica de oferta, sino por una demanda excesiva que supera las capacidades de la cuenca, aun en condiciones de año medio. Las veintinueve SZH restantes presentan la siguiente distribución para condición de año medio: catorce SZH pasan a un IUA «muy alto», catorce pasan a un IUA «alto» y una SZH pasa a un IUA «moderado», lo que denota una dependencia de la competencia por uso relativa a la condición de oferta.

Los resultados de IUA por SZH para las condiciones de año medio y año seco se presentan en el **Anexo 3**. Dado que el IUA se incluye en el proceso de análisis integrado, los mapas correspondientes se presentan en ese capítulo.

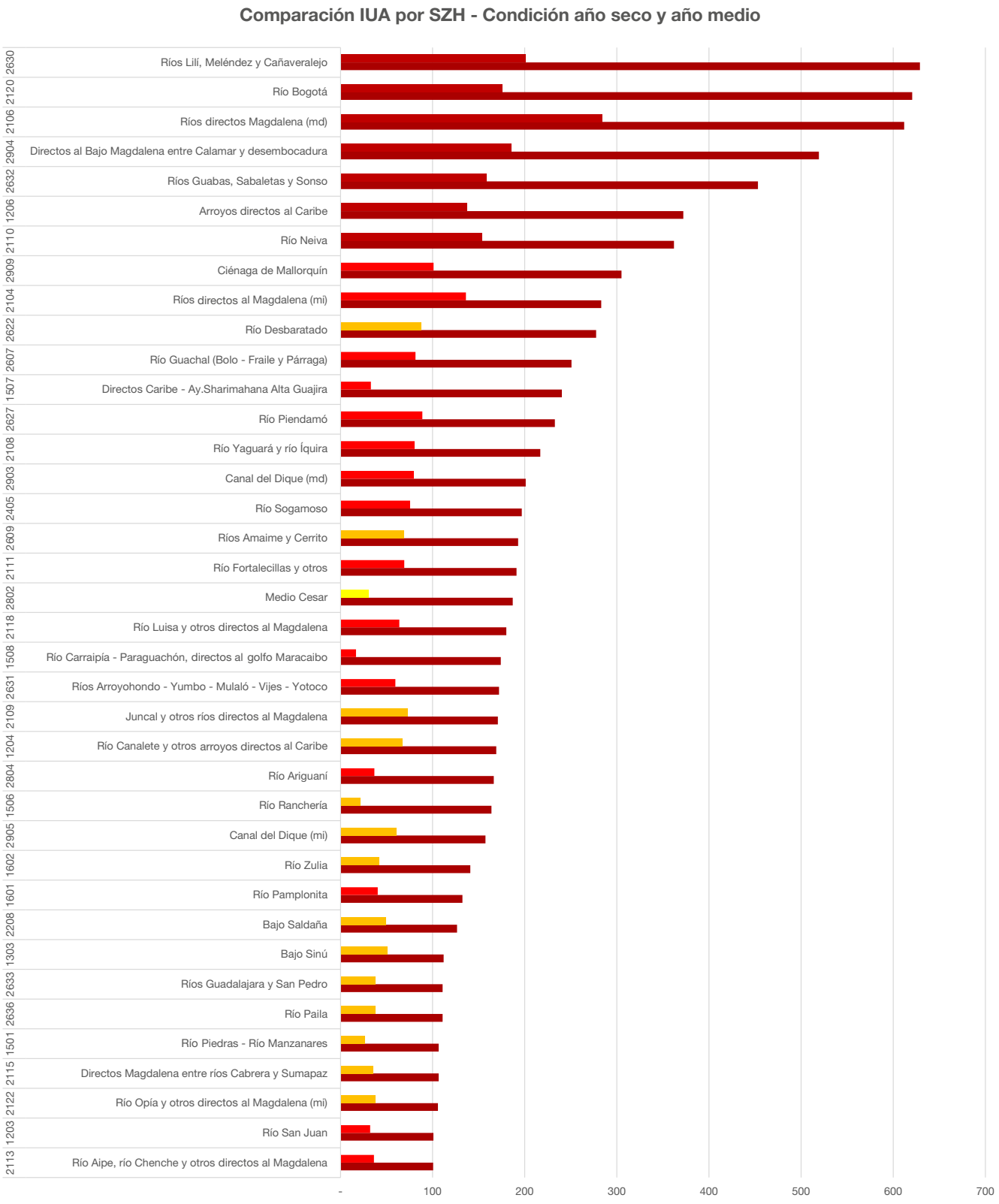



Figura 196. Listado de SZH en estado crítico de IUA en año seco y estado para año medio.

### 7.3.2 Relación entre la huella hídrica azul y la oferta disponible (IARC)

El índice de agua no retornada a la cuenca IARC[10] es el valor numérico que califica, en una de seis categorías, la relación entre la huella hídrica azul generada por los sectores económicos presentes en una subzona hidrográfica en un periodo de tiempo y la oferta hídrica superficial disponible para ese mismo periodo.

El indicador refleja la capacidad que tienen las subzonas hidrográficas para sostener los consumos de agua generados por las actividades económicas que se desarrollan en una subzona hidrográfica, entendiendo por consumo de agua el volumen extraído y que no retorna. En el caso de que una subzona hidrográfica presente un estado de «crítico», significa que esta ya agotó su disponibilidad de agua superficial para satisfacer los requerimientos hídricos de las actividades económicas que se desarrollan en dicha subzona; y que, según la información oficial analizada, existen usos que son abastecidos por fuentes no contabilizadas ni reportadas, o que hay actividades que tienen requerimientos hídricos y que se encuentran insatisfechos, generando reducción de productividad.

En la Tabla 57, se presentan los rangos de evaluación del IARC, que representan los valores que puede llegar a tomar el índice y que han sido clasificados en seis categorías, de acuerdo con las cuales se califica la capacidad que tienen las subzonas hidrográficas para sostener actividades económicas en función de la oferta hídrica superficial disponible. Como señal de alerta, a cada nivel de amenaza se le ha asignado un color. En la siguiente tabla se registra la relación entre valores y calificación:

Tabla 57. Rangos de evaluación IARC.

| Rango IARC | Categoría |
|---|---|
| IARC < 0,01 | Muy bajo |
| 0,01 < IARC < 0,1 | Bajo |
| 0,1 < IARC < 0,2 | Moderado |
| 0,2 < IARC < 0,5 | Alto |
| 0,5 < IARC < 1,0 | Muy alto |
| IARC > 1,0 | Crítico |

En la Figura 197 se presenta la distribución porcentual de estado de IARC para todas las SZH en Colombia, evaluado el indicador para una condición de año medio en la oferta disponible.

En la Figura 198, se presenta la distribución porcentual de estado de IARC para todas las SZH en Colombia, evaluado el indicador para una condición de año seco en la oferta disponible.

La conclusión de la distribución de estado de IARC para SZH es que la condición de año seco aumenta de 5 % a 13 % en número de SZH que están en categorías «crítico», «muy alto» y «alto», en comparación con la condición de año medio.

La Figura 199 hace posible identificar cuál es la incidencia del cambio en la condición climática para el cambio de estado de IARC en las SZH.

Del análisis de la gráfica se establece que hay una clara concentración de SZH en condición de IARC crítico, muy alto, alto o moderado para el AH Magdalena-Cauca; allí se puede ver cómo de cinco SZH en condición crítica por agua no retornada en año seco, en un año medio esa condición desaparece, lo que implica que esas SZH en el AH Magdalena-Cauca tienen una condición determinada por la disponibilidad de agua.

El mapa de la Figura 200 (IARC por SZH en Colombia, año medio) permite identificar las principales subzonas hidrográficas en donde existe un mayor porcentaje de agua extraída sin retorno, lo que genera una exclusión física de simultaneidad entre actividades que usan el agua en una misma cuenca.

[10] El IARC se refiere al «índice de escasez de agua azul», como está denominado en el *Manual de Huella Hídrica* (Hoekstra et al., 2011) publicado por la Red de Huella Hídrica (Water Foot print Network) como «Blue Water Scarcity Index». Su definición y cálculo corresponde a la metodología propuesta en dicho Manual; no obstante, desde el ENA 2014 (Ideam, 2015) y para el contexto nacional, se propuso una modificación a su nombre, con el fin de conseguir coherencia y armonía con el trabajo previo desarrollado sobre índices relativos al agua en estudios nacionales anteriores, quedando incluido en el grupo de indicadores de presión al recurso hídrico bajo la denominación de «índice de agua no retornada a la cuenca - IARC».

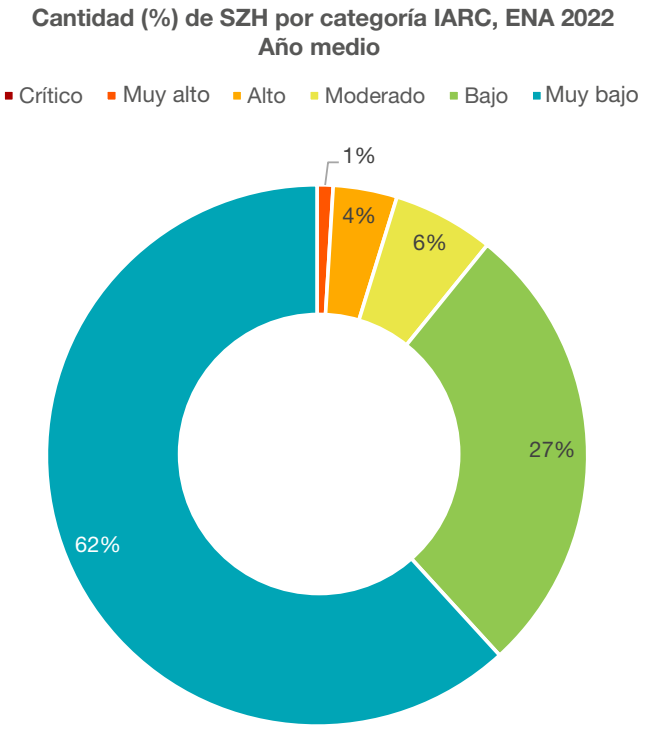



Figura 197. Distribución porcentual de estado de IARC por SZH en Colombia, año medio.

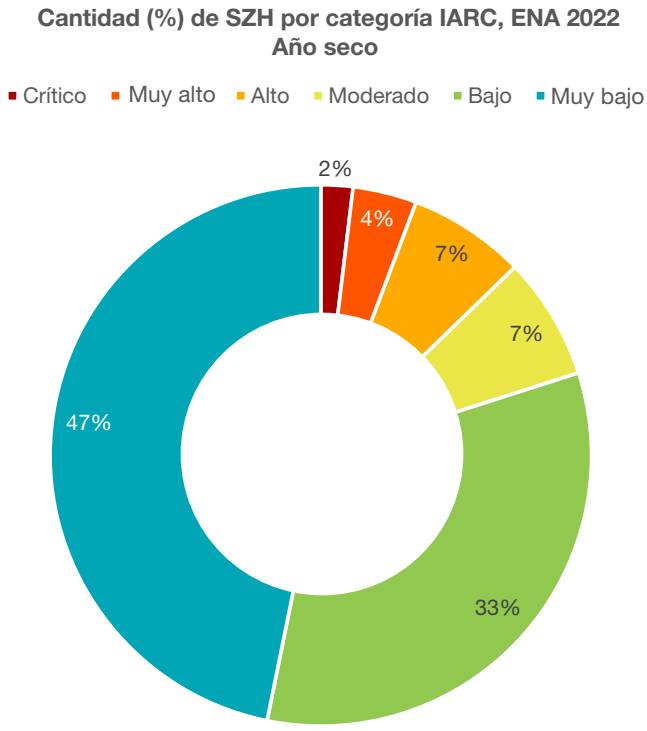



Figura 198. Distribución porcentual de estado de IARC por SZH en Colombia, año seco.

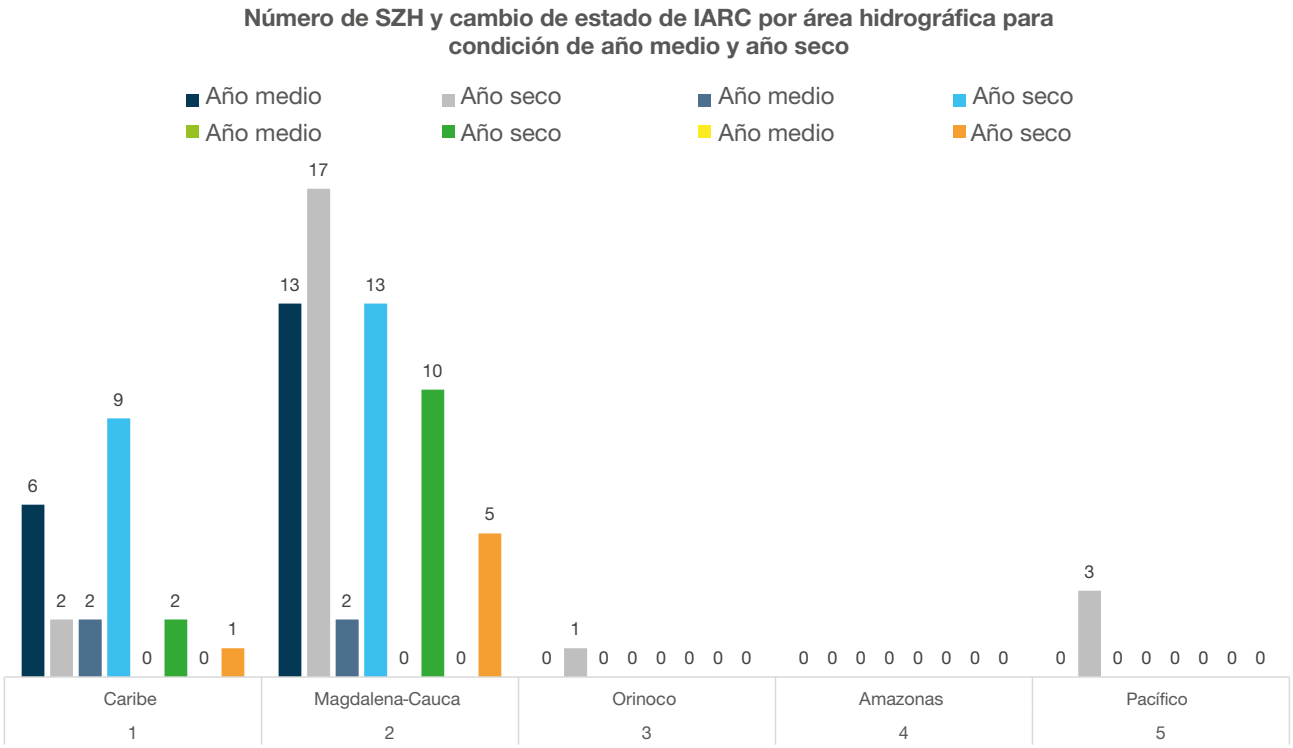



Figura 199. Número de SZH y cambio de estado de IARC por AH para condición de año medio y año seco.

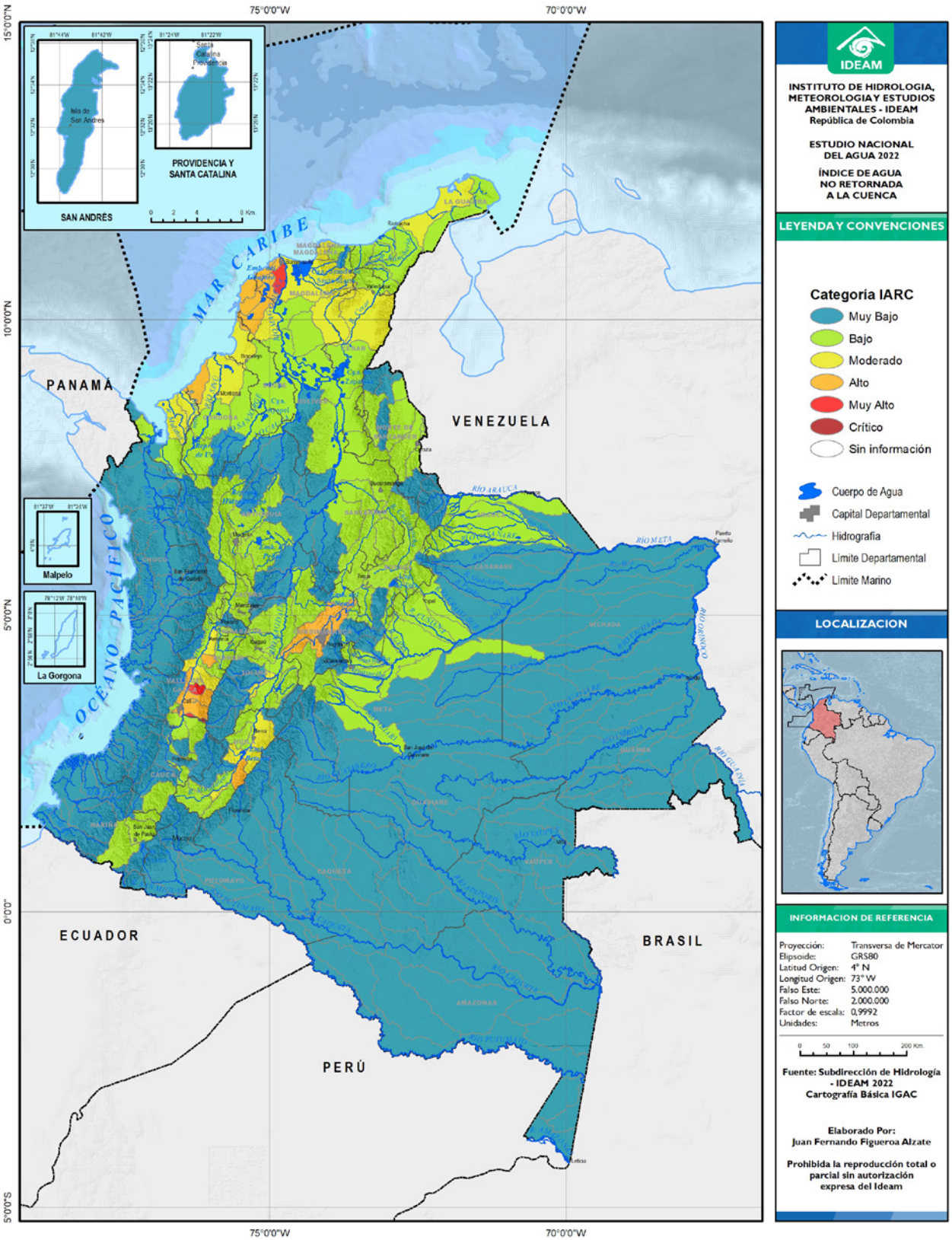



Figura 200. Mapa nacional IARC por SZH en Colombia, año medio.

En la Figura 201, se relacionan las seis SZH que tiene la condición de IARC crítico para la condición hidrológica de año seco y se comparan con el IARC para condición de año medio.

Estas SZH que tienen IARC crítico para la condición hidrológica de año seco representan la condición de mayor nivel de uso no retornado en relación con una menor oferta hídrica disponible; por tanto, la mayor condición de competencia por uso que complementa la demanda hídrica. Las seis SZH presentan un cambio en el estado del indicador a partir del cambio en la condición de año hidrológico a una condición de año medio: tres SZH pasan a un IARC «muy alto», dos pasan a un IARC «alto» y una SZH pasa a un IARC «moderado», lo que denota una dependencia de la competencia por uso no retornado relativa a la condición de oferta.

Los resultados de IARC por SZH y para las condiciones de año medio y año seco se presentan en el **Anexo 2**.

**Comparación IARC por SZH - condición año seco y año medio**

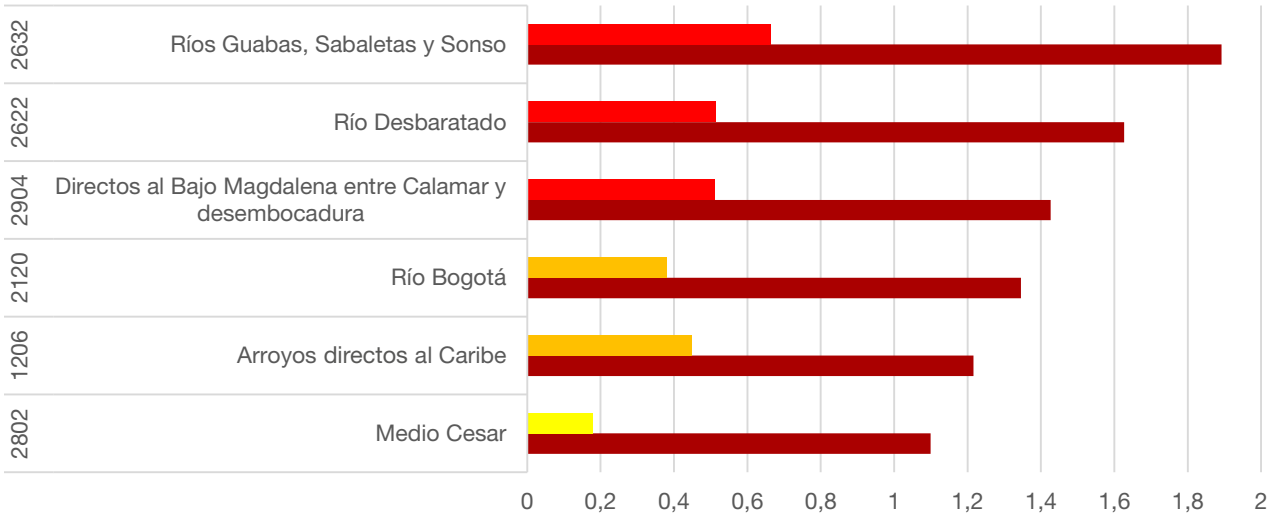



Figura 201. Listado de SZH en estado crítico de IARC en año seco y estado para año medio.

## 7.3.3 Evaluación de la sostenibilidad de la huella hídrica verde (IPHE)

El *índice de presión hídrica a los ecosistemas* o IPHE[11] es el valor numérico que califica —en una de seis categorías— la relación entre la huella hídrica verde generada por el sector agropecuario y forestal presente en una subzona hidrográfica en un periodo de tiempo frente a la disponibilidad de agua verde para ese mismo periodo.

A través de este índice se busca identificar en qué cuencas se presenta competencia por agua verde asociada a competencia por uso del suelo entre las actividades existentes, específicamente, del sector agropecuario y las zonas de protección de ecosistemas estratégicos requeridas para la provisión y mantenimiento de servicios ecosistémicos en las cuencas. Este índice denota la «fracción de apropiación» de los recursos de agua verde disponibles, la cual surge al relacionar el recurso de agua verde

[11] Se refiere al «índice de escasez de agua verde», denominado en el *Manual de Huella Hídrica* (Hoekstra et al., 2011) publicado por la Red de Huella Hídrica (Water Footprint Network) como «Green Water Scarcity Index». Su definición y cálculo corresponde a la metodología propuesta en dicho Manual; no obstante, desde el ENA 2014 (Ideam, 2015) y para el contexto nacional, se propuso una modificación a su nombre, con el fin de conseguir coherencia y armonía con el trabajo previo desarrollado sobre índices relativos al agua en estudios nacionales anteriores, quedando incluido en el grupo de indicadores de presión al recurso hídrico bajo la denominación de «índice de presión hídrica a los ecosistemas o IPHE».

empleado en las actividades productivas (sector agropecuario y forestal) con la disponibilidad de agua verde por cuenca hidrográfica (subzona hidrográfica).

Para la comprensión del resultado de este indicador, se han establecido seis categorías de valores que permiten estimar el estado de este en cada una de las subzonas hidrográficas a nivel nacional. Como señal de alerta, a cada nivel de amenaza se le ha asignado un color. Los valores «críticos» denotan que existe clara competencia por agua verde entre el uso del suelo vinculado al sector agropecuario y las áreas de protección asociadas a ecosistemas estratégicos en las cuencas; mientras que valores «bajos» y «muy bajos» indican una situación favorable para ecosistemas estratégicos en las cuencas.

En la Tabla 58 se registra la relación entre valores y calificación para el indicador:

Tabla 58. Rangos de evaluación IPHE.

| Rango IPHE | Categoría |
|---|---|
| IPHE < 0,1 | Muy bajo |
| 0,1 < IPHE < 0,3 | Bajo |
| 0,3< IPHE < 0,5 | Moderado |
| 0,5 < IPHE < 0,8 | Alto |
| 0,8 < IPHE < 1,0 | Muy alto |
| IPHE > 1,0 | Crítico |

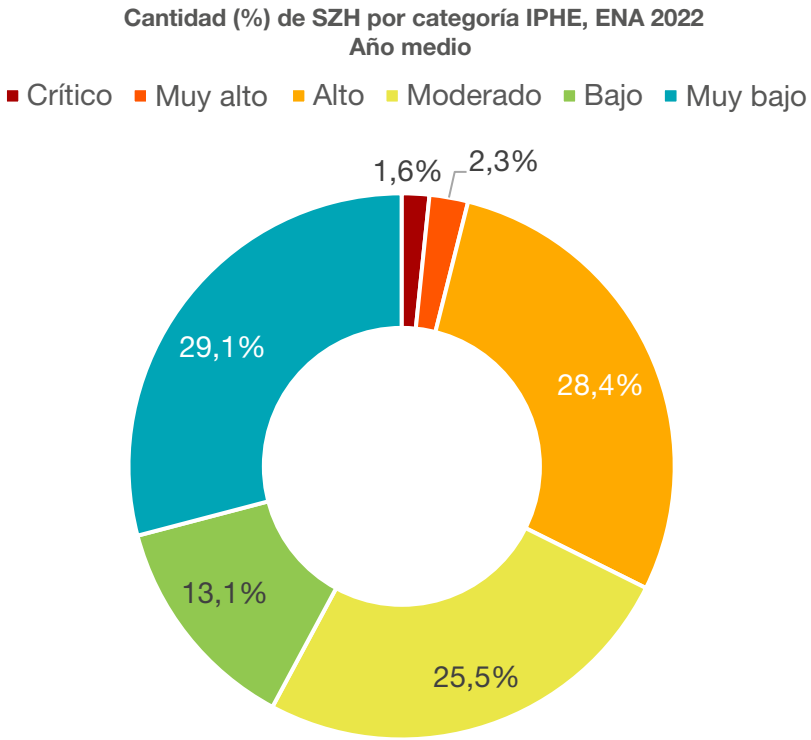



Figura 202. Distribución porcentual de estado de IPHE por SZH en Colombia.

En la Figura 202, se presenta la distribución porcentual de estado de IPHE para todas las SZH en Colombia, evaluado el indicador para una condición de año medio en la oferta disponible.

La conclusión de la distribución de estado de IPHE por SZH es que un total de noventa y nueve SZH (que equivalen al 32 % de las SZH del país) están en categorías «crítica», «muy alto» y «alto», lo que implica un nivel de presión alto por el uso del agua verde —y por tanto del uso del suelo— frente a las necesidades de los ecosistemas estratégicos de alta montaña.

La gráfica de la Figura 203 relaciona las once SZH que tiene la condición de IPHE «crítico» y «muy alto» en un año hidrológico promedio.

Este IPHE crítico y muy alto significa que hay zonas con una disponibilidad de agua verde limitada (áreas con uso de suelo con potencial productivo agropecuario) y que existe una demanda de agua verde, estimada con base en evidencia estadística, que excede las posibilidades de la SZH; esto normalmente se traduce en actividad productiva agropecuaria de áreas que tienen una limitación de conservación.

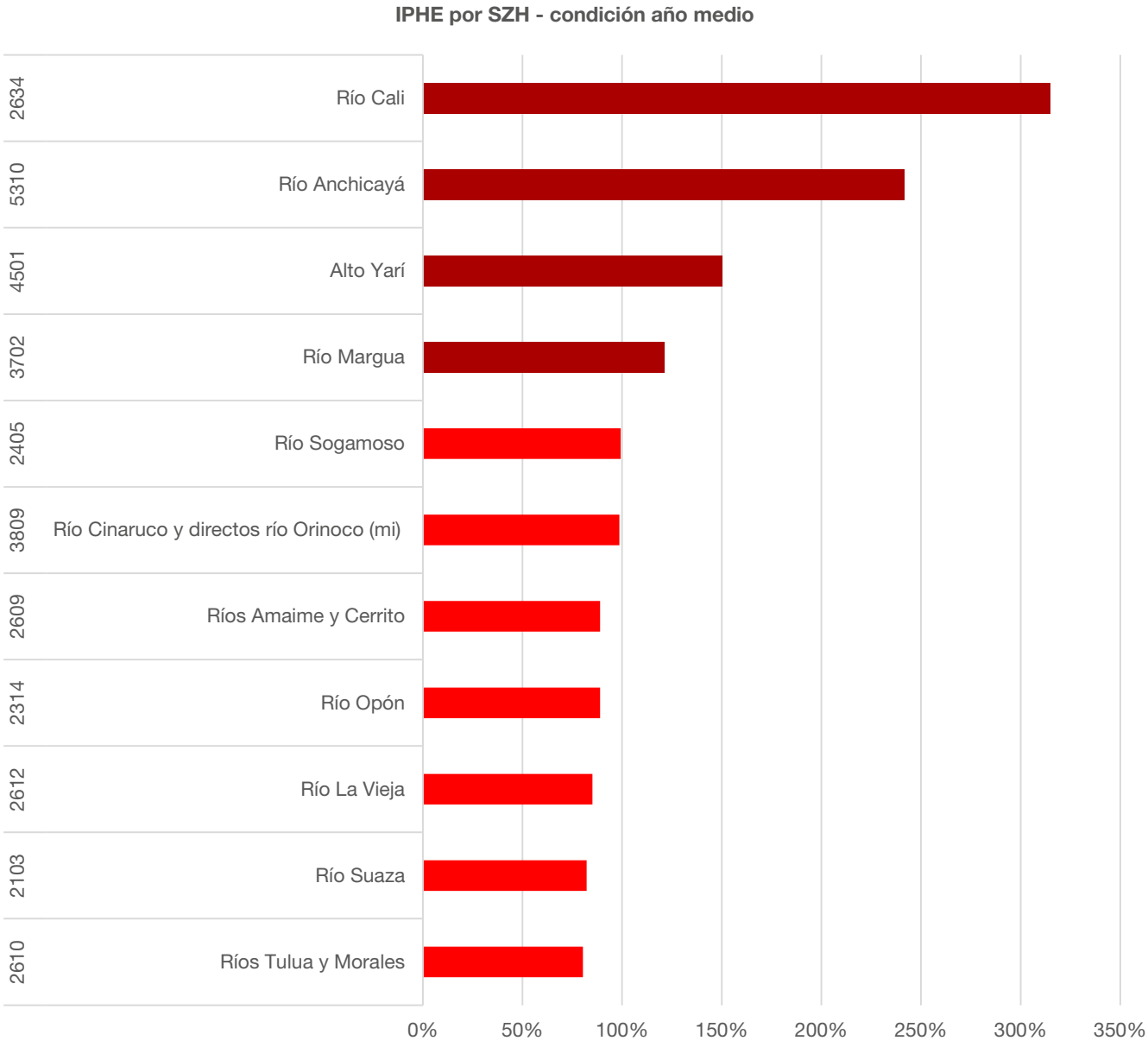



Figura 203. Listado de SZH en estado crítico de IPHE en año medio.

Los resultados de IPHE por SZH y para las condiciones de año medio se presentan en el **Anexo 2**. Dado que el IPHE se incluye en el proceso de análisis integrado, los mapas correspondientes se presentan en ese capítulo.

### 7.3.4 Relación entre la demanda y la huella hídricas azul (IEUA)

El *índice de eficiencia en el uso del agua* o IEUA es el valor numérico que califica —en una de seis categorías— la relación entre la huella hídrica azul multisectorial (volumen de agua extraído que no retorna a la cuenca) en una subzona hidrográfica en un periodo de tiempo frente a la demanda hídrica multisectorial (volumen de agua extraído) en una subzona hidrográfica para el mismo periodo.

Su definición y cálculo corresponde a la metodología propuesta en el ENA 2014 (Ideam, 2015) para el contexto nacional, y quedó incluido en el grupo de indicadores de presión al recurso hídrico.

Cuando el agua que no retorna a la cuenca se encuentra más cerca del valor extraído para suplir las necesidades asociadas a la demanda, lo que significa una mayor eficiencia en el uso de agua y una reducción en el margen asociado a los flujos de retorno. Lo anterior implica la posibilidad de una reducción en las pérdidas y una clara identificación del volumen de uso que puede ser susceptible a acciones de reúso y recirculación en el sistema productivo.

En la siguiente tabla (Tabla 59) se registra la relación entre valores y calificación (categoría):

Tabla 59. Rangos de evaluación IEUA.

| Rango IEUA | Categoría |
|---|---|
| IEUA < 0,01 | Muy bajo |
| 0,01 < IEUA < 0,1 | Bajo |
| 0,1 < IEUA < 0,2 | Moderado |
| 0,2 < IEUA < 0,5 | Alto |
| 0,5 < IEUA < 1,0 | Muy alto |

- Categoría «muy bajo»: significa que más del 99 % del agua extraída está asociada a usos que luego retornan a la fuente, es susceptible parcialmente de medidas de reúso y recirculación, y de pérdidas del sistema. Un aumento en la eficiencia en este volumen de agua tiende a reducir la demanda hídrica (extracción).

- Categoría «bajo»: significa que entre el 99 % y el 90 % del agua extraída está asociada a usos que luego retornan a la fuente, es susceptible parcialmente de medidas de reúso y recirculación, y de pérdidas del sistema. Un aumento en la eficiencia en este volumen de agua tiende a reducir la demanda hídrica (extracción).

- Categoría «moderado»: significa que entre el 90 % y el 80 % del agua extraída está asociada a usos que luego retornan a la fuente, es susceptible parcialmente de medidas de reúso y recirculación, y de pérdidas del sistema. Un aumento en la eficiencia en este volumen de agua tiende a reducir la demanda hídrica (extracción).

- Categoría «alto»: significa que entre el 80 % y el 50 % del agua extraída está asociada a usos que luego retornan a la fuente, es susceptible parcialmente de medidas de reúso y recirculación, y de pérdidas del sistema. Un aumento en la eficiencia en este volumen de agua tiende a reducir la demanda hídrica (extracción).

- Categoría «muy alto»: significa que menos del 50 % del agua extraída está asociada a usos que luego retornan a la fuente, es susceptible parcialmente de medidas de reúso y recirculación, y de pérdidas del sistema. Un aumento en la eficiencia en este volumen de agua tiende a reducir la demanda hídrica (extracción).

Para el análisis e interpretación del resultado del IEAU, se establecieron cinco categorías que resultan coherentes con las utilizadas para la valoración del *índice de agua no retornada a la cuenca* (IARC) —que está directamente relacionado con la huella hídrica azul— y del *índice de uso de agua* (IUA) —que está relacionado en forma directa con

la demanda hídrica—. Los valores «muy alto» evidencian que el valor de huella hídrica azul, que es agua que no retorna a la cuenca pues fue efectivamente consumida, se encuentra más cerca del valor extraído para suplir las necesidades asociadas a la demanda; esto significa una mayor eficiencia en el uso y una reducción en el margen asociado a los flujos de retorno que implica la posibilidad de una disminución en las pérdidas y una clara identificación del volumen de uso que puede ser susceptible a acciones de reúso y recirculación en el sistema productivo. Los valores «bajos» y «muy bajos» indican una situación de distanciamiento entre los valores de huella hídrica azul y el valor extraído asociado a la demanda, lo que significa un volumen importante que se extrae y retorna e implica que, con un aumento en el uso eficiente del agua, se puede reducir la demanda hídrica de la unidad territorial de análisis.

En la Figura 204 se muestra la distribución porcentual de estado de IEUA para todas las SZH en Colombia.

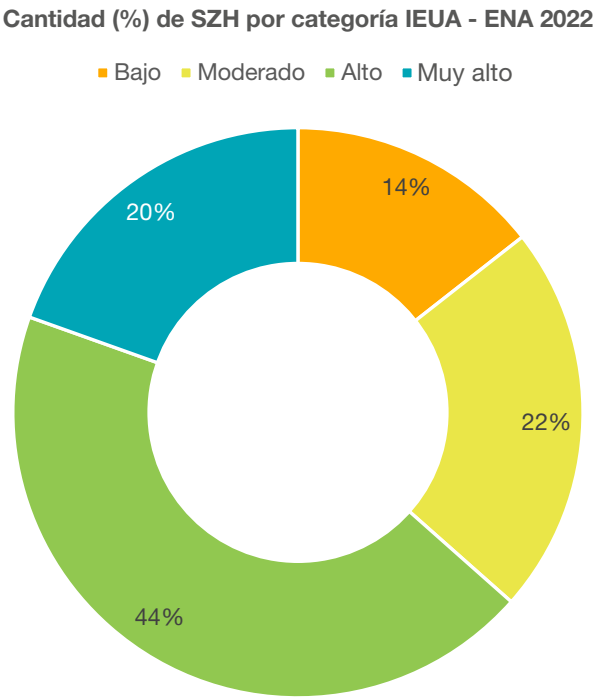



Figura 204. Distribución porcentual de estado de IEUA por SZH en Colombia en un año hidrológico medio.

La conclusión de la distribución de estado del IEUA por SZH es que un total de cuarenta y cinco SZH (que equivalen al 36 % de las SZH del país) están en categorías de «baja» y «moderada» eficiencia en el uso del agua. Esto implica que un porcentaje superior al 80 % del agua que es extraída es devuelta después a la cuenca y resulta susceptible parcialmente de medidas de reúso y recirculación, y de pérdidas del sistema. Un aumento en la eficiencia en este volumen de agua tiende a reducir la demanda hídrica (extracción). El 20 % de las SZH del país estarían en la categoría de «muy alta» eficiencia, lo que implica que, frente a la extracción total multisectorial, menos del 50 % del volumen retorna; esto implica que hay un volumen superior al 50 % del total que se incorpora en productos de valor añadido, se evapora por procesos productivos, se trasvasa a otra cuenca o se encuentra incluido en procesos de circularidad en reúso, por lo que no se retorna a la fuente.

El mapa de la Figura 205 muestra la categoría del IEUA para las SZH en Colombia en un año hidrológico medio.

Los resultados de IEUA por SZH y para las condiciones de año medio se presentan en el **Anexo 2**.

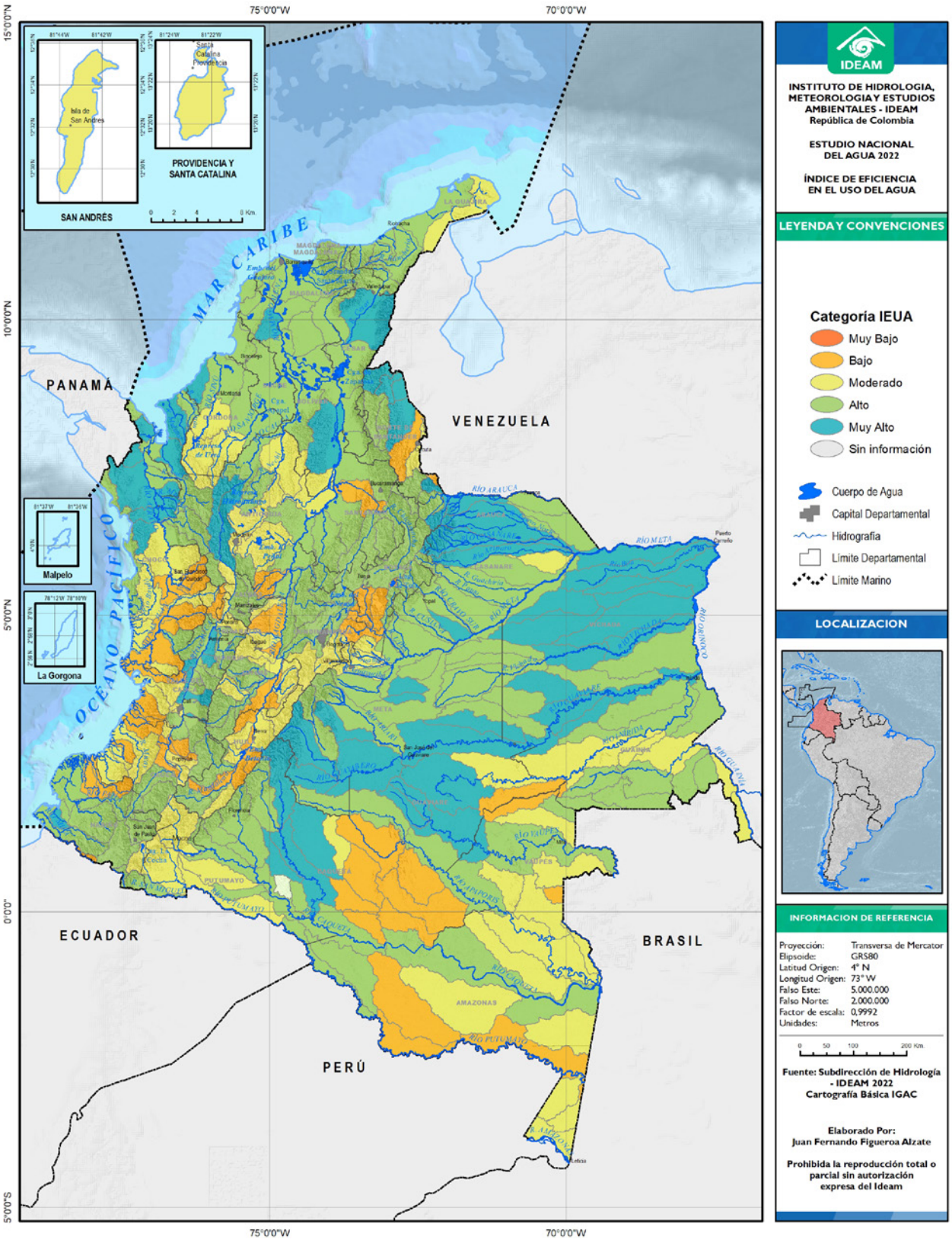



Figura 205. Mapa nacional IEUA por SZH en Colombia, año medio.

## 7.4 Flujos de agua virtual

Los *flujos de agua virtual* hacen referencia a los intercambios de agua que se dan entre países gracias al comercio internacional. Por medio del indicador de huella hídrica es posible calcular el volumen de agua virtual que sale de un país asociado a los productos que exporta y la forma como se distribuye esta agua en los países importadores; esto hace posible analizar cómo el comercio puede favorecer la sostenibilidad del recurso hídrico, en especial en los países con menor oferta hídrica, en los cuales el costo de oportunidad de usar agua para la producción de determinados bienes es más grande que el costo de oportunidad de importar.

El principal usuario de agua a nivel mundial es el sector agrícola y pecuario, por lo que los análisis de flujos de agua virtual se concentran en los productos agrícolas exportados.

En Colombia, el indicador de huella hídrica agrícola tiene su mayor proporción asociado a la huella hídrica verde, gracias a un alto nivel de pluviosidad que implica un menor requerimiento hídrico soportado por agua de riego; de esta forma, es posible inferir que el costo de oportunidad del uso del agua para la agricultura en Colombia es más bajo que en otros países, en donde la agricultura depende de la infraestructura y de tecnologías para el riego de cultivos, lo que compite directamente con otros usos de agua, incluido la dotación del agua necesaria para las personas. Lo anterior implica que los productos agrícolas colombianos exportados tienen una ventaja competitiva en los mercados internacionales de alimentos en torno a la sostenibilidad ambiental de los territorios de origen.

El análisis del *flujo de agua virtual* en el marco del ENA 2022 parte de un análisis de los volúmenes de los ocho principales cultivos de exportación del país exportados en 2020; estos productos fueron: aguacate, banano, cacao, café, caña de azúcar, flores y follajes, palma de aceite y plátano; con esto se obtiene un resultado de huella hídrica de dicha producción y una estimación del volumen de agua que fue requerido para satisfacer esta actividad identificando el volumen de agua virtual exportada, qué países importadores generaron esta demanda y de qué área hidrográfica salió. La gráfica de la Figura 206 muestra la distribución porcentual del flujo de agua virtual asociado con estos ocho cultivos.

La distribución de los flujos de agua virtual por producto agrícola priorizado identifican al café como el cultivo que representa la mayor cantidad de agua virtual con un 45 % del total, seguido por plátano y palma, con el 29 % y el 17 %, respectivamente. La gráfica permite identificar estos tres cultivos con una concentración de más del 90 % de todo el flujo de agua virtual de Colombia para el año de análisis.

En relación con el destino de flujos de agua virtual exportados desde Colombia en el año 2020, la gráfica de la Figura 207 muestra la proporción de volúmenes de agua en relación con los países destino que generaron la demanda de productos.

Estados Unidos es el principal destino del agua virtual colombiana, con una participación del 31 %, gracias al fuerte relacionamiento en términos comerciales; y es el consumidor principal de la mayoría de los cultivos priorizados, lo cual representa alrededor de 3832 millones de $m^3$ por exportación para el año 2020.

Los flujos de agua virtual permiten también identificar el origen del agua y, por lo tanto, separar el volumen de agua azul y de agua verde involucrado en la producción y luego el exportado. Del análisis se puede determinar que el origen aproximado del 90 % del agua virtual exportada es agua verde, que representa aprovechamiento de agua de la humedad del suelo que está libre de competencia sectorial por uso directo; esto ofrece una ventaja comparativa frente al mismo producto con otro origen que depende para su producción de agua azul, que puede implicar competencia por uso en origen. La Figura 208 muestra la proporción de agua verde y agua azul por cultivo en flujos de agua virtual desde Colombia en 2020.

**Distribución de flujos de agua virtual total por cultivos de origen, Colombia, 2020**

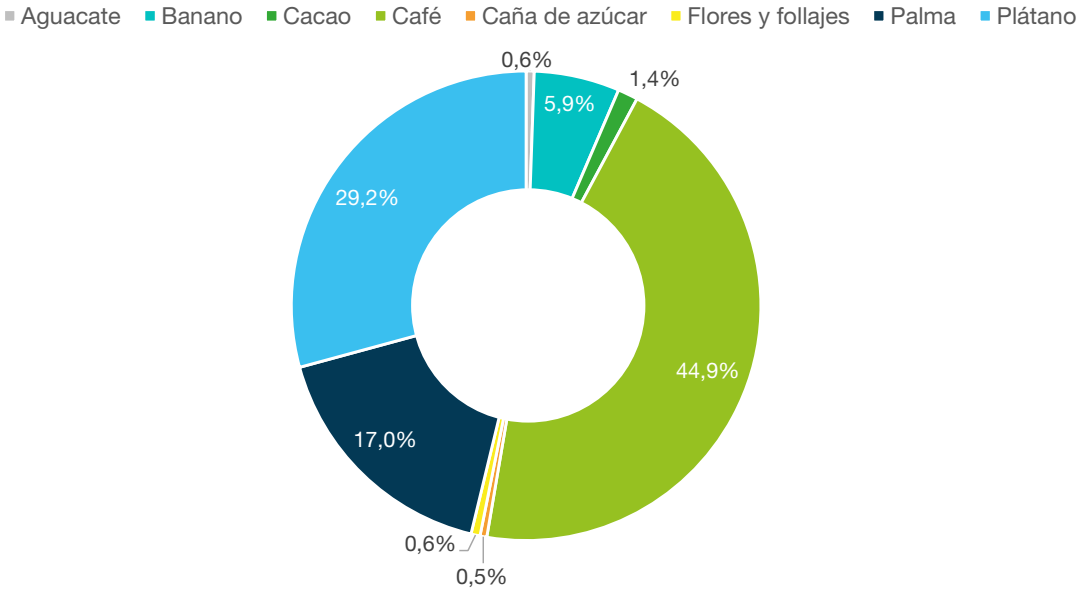



Figura 206. Distribución de flujos de agua virtual total. Colombia, 2020. Datos de Trade Map[12].

**Destino de flujos de agua virtual exportados desde Colombia**

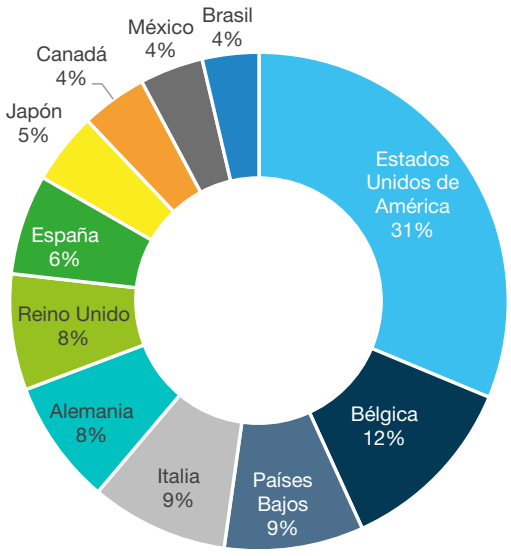



Figura 207. Destino de flujos de agua virtual exportados desde Colombia, 2020. Datos de Trade Map.

[12] Trade Map es una base de datos *online* del ITC (International Trade Center) que ofrece para consulta las estadísticas del comercio para el desarrollo internacional de las empresas, con consolidado de datos comerciales mensuales, trimestrales y anuales, valores de importación y exportación, volúmenes, tasas de crecimiento, cuotas de mercado, etc. https://www.trademap.org/

En esta Figura 208 se identifica la proporción verde y azul del agua virtual exportada por cultivos, y se evidencia que todos los cultivos tienen una participación mayoritaria de agua verde; también resalta el diferencial competitivo que tiene Colombia al tener un sector agrícola que, en general, tiene baja dependencia del uso de agua azul que impacta de forma directa al comportamiento de los productos agrícolas de exportación; esto genera un menor impacto del sector agroexportador sobre el uso de agua y la competencia sectorial en los territorios origen de los productos de exportación.

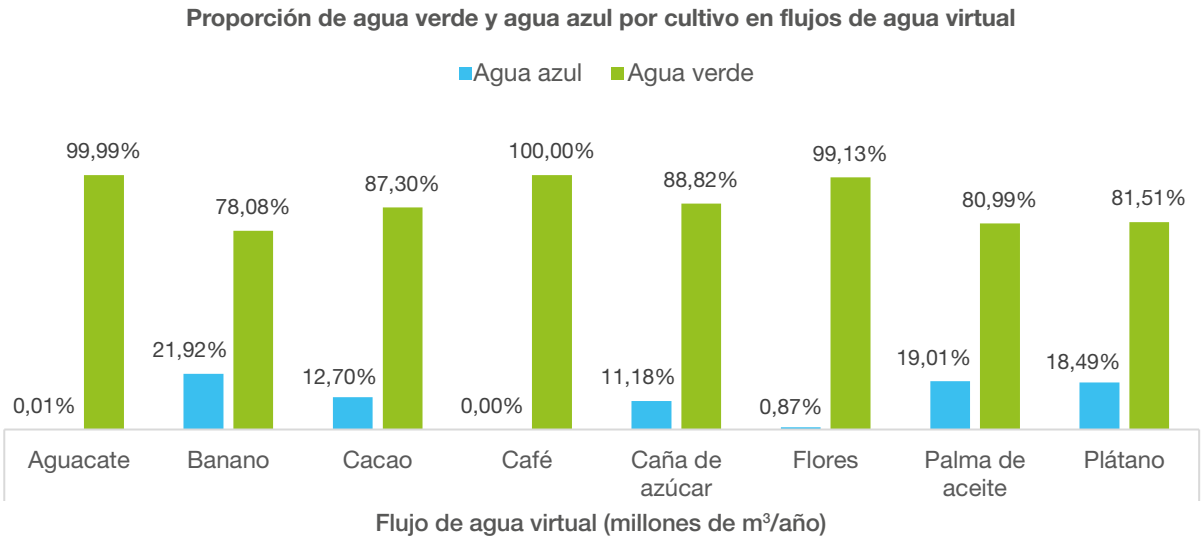



Figura 208. Proporción de agua verde y agua azul por cultivo en flujos de agua virtual desde Colombia, 2020.

## 7.5 Proyecciones de uso de agua 2021-2040

En este subcapítulo, se presentan las proyecciones de uso del agua en el marco del ENA 2022 para el periodo 2021-2040. Este ejercicio parte del reconocimiento de las variables climáticas y económicas como condicionantes del comportamiento de la actividad antrópica y la demanda de agua. Para este estudio se utilizó la misma metodología de proyección desarrollada en ENA 2018 y responde a las mismas preguntas: de acuerdo con las tendencias de crecimiento de la economía, ¿qué sectores económicos ejercerán presión de uso en el recurso hídrico al año horizonte? ¿Cuánta agua demandará la población colombiana al año horizonte de acuerdo con su tendencia de crecimiento?

Las proyecciones de uso del agua solo consideran la demanda hídrica y se calculan para los siguientes sectores: agrícola y poscosecha; pecuario, minería, hidrocarburos, energía, servicios y doméstico. Se excluyen de las proyecciones los otros sectores, dada la incertidumbre incluida en la información base que no permite generar una estimación de demanda hídrica proyectada confiable.

Este análisis de proyecciones en el uso del agua se plantea con un año horizonte a 2040, lo que hace posible incluir los resultados correspondientes a la variación asociada al cambio climático coincidente con ese año. El análisis de variabilidad climática complejiza el proceso que permite estimar el comportamiento futuro de cada sector, por la consideración de las variables sectoriales y territoriales que determinan comportamientos diferenciales en cada subzona hidrográfica, dependiendo si es época seca o época húmeda. En términos generales, los comportamientos sectoriales se evalúan bajo aspectos como los siguientes, entendiendo la interacción entre sectores y la competencia por el recurso:

- La menor disponibilidad de lluvia genera una variación en la proporción de agua de riego necesaria para completar el requerimiento hídrico

de los cultivos que no consigue quedar satisfecho con la precipitación. Un aumento en el agua de riego generará situaciones de competencia sectorial por el agua, donde el sector agrícola tendrá presencia importante.

- El sector pecuario bovino se podría ver afectado por la escasez localizada en áreas para pastoreo asociada a menores lluvias. Otros subsectores pecuarios se podrían ver afectados localmente, y tendrían que ajustar sus prácticas y optimizar el consumo de agua para reducir su incidencia en la competencia por el uso de agua.

- La disminución de las precipitaciones podrá generar situaciones de escasez localizada de agua que aumentará la probabilidad de competencia por el uso del agua. Seguramente el abastecimiento de los acueductos disminuirá y se tendrá que almacenar agua.

- Ante una escasez de lluvias, el sector de generación eléctrica tendrá que ajustar sus reglas de operación de embalses, pues las entradas de agua tendrán una afectación en estrecha relación con la reducción local y regional de lluvias.

Con esta base teórica, se realizó un análisis de prospectiva para los sectores económicos compuesto por dos tipos de ejercicio: (1) análisis cualitativo basado en la revisión de las metas de crecimiento para los sectores en el periodo 2021-2040 planteadas por el Gobierno nacional y los diferentes gremios; (2) un análisis cuantitativo basado en la construcción de modelos estadísticos para proyectar el crecimiento de los principales sectores considerados en la demanda hídrica nacional y sectorial, para el periodo 2021-2040.

En el procedimiento de cálculo general, se aplicaron los siguientes pasos:

- Análisis de comportamiento histórico de la demanda hídrica de los sectores económicos.
- Identificación de las metas establecidas por el Gobierno y los sectores en relación con metas de crecimiento, base en precios, exportaciones, previsiones de inflación, etc.
- La estimación de modelos Arima y modelos ADL, y pruebas de validación.
- Generación de los modelos de dinámica de sistemas.
- Elección de la proyección definitiva.

Es de resaltar que la variación de precipitación asociada al cambio climático tiene un nivel de incidencia diferenciado a escala sectorial; el sector agrícola es el más afectado, dada la clara dependencia de la demanda hídrica agrícola frente a la disponibilidad de precipitación. Para abordar el efecto del cambio climático en cada sector, se aplicó el siguiente procedimiento:

1. Para el sector agrícola se utilizó un método de cálculo directo de la demanda hídrica de cultivos priorizados con el escenario de cambio climático, que implica una reducción porcentual en la precipitación.

2. Para los sectores no agrícolas se plantean tres escenarios: escenario optimista o de mínimo uso de agua, escenario tendencial o medio, y escenario pesimista o de uso máximo de agua. Los escenarios se plantean bajo los siguientes supuestos generales:

    a. La efectividad de los programas de uso eficiente puede ser un condicionante del comportamiento de los usuarios del agua que pueden hacer uso de incentivos para reducir consumos e innovar en estrategias para el reúso o la recirculación del agua.

    b. Las autoridades ambientales son también condicionantes del comportamiento de los usuarios en el marco de su ejercicio de vigilancia y control sobre el uso del agua y los usuarios.

    c. El crecimiento y la concentración de la población colombiana determinan la estimación de proyecciones de uso del agua. Aunque en Colombia la población crece a tasas bajas, se sigue concentrando el uso doméstico en las grandes ciudades. La pandemia de 2020 trajo consigo cambios en los patrones de comportamiento de la

población que se manifiesta en la dispersión de esta hacia la periferia de las grandes capitales, lo que genera una presión sobre el agua con una presión atípica que se puede prolongar durante mucho tiempo.

d. Fenómenos puntuales como la pandemia de COVID-19 demostraron que la actividad económica sectorial redujo su dinámica entre 2019 y 2020. Sin embargo, las medidas de apertura tomadas a finales del 2020 permitieron que se retomara la producción de bienes y servicios con cierta rapidez en 2021.

Los escenarios generales y sus supuestos específicos se presentan en la Tabla 60.

Tabla 60. Descripción de escenarios (optimista, tendencial y pesimista) para proyecciones de uso de agua.

| Optimista o de mínimo uso de agua | Tendencial o medio | Pesimista o de máximo uso de agua |
|---|---|---|
| Se prevé que haya un incremento en la producción agropecuaria de productos que tienen un proceso de poscosecha, con un consecuente incentivo para un uso más eficiente del agua. | Tanto las políticas de incentivo como los programas de los sectores de café, banano y palma proyectan un crecimiento de la producción para cubrir el mercado interno y el mercado internacional. No se prevé una mejora en la tecnología, por lo que el uso del agua se mantiene en un volumen estable. | Tanto las políticas de incentivo como los programas de los sectores de café, banano y palma proyectan un crecimiento de la producción para cubrir el mercado interno y el mercado internacional; pero la expansión de esta producción se llevará a cabo con las mayores ineficiencias en el uso de agua. |
| Si bien se incrementa la producción de bovinos, porcinos y aves, también se considera que este aumento en la producción generará un incentivo para un uso más eficiente del agua. | Tanto las políticas de incentivo como los programas de los sectores avícola, porcino y bovino proyectan un crecimiento de la producción para cubrir el mercado interno y las oportunidades del mercado internacional; todo esto con la misma tecnología y, por lo tanto, con el mismo uso de agua promedio. | Tanto las políticas de incentivo como los programas de los sectores avícola, porcino y bovino proyectan un crecimiento de la producción para cubrir el mercado interno y el mercado internacional; pero la expansión de esta producción se llevará a cabo con las mayores ineficiencias en el uso de agua. |
| El programa de uso eficiente incentiva a moderar el uso de agua y, por lo tanto, a mejorar su eficiencia. También se incentiva el reúso y la recirculación. | No se implementan incentivos, se sigue haciendo el mismo uso del agua y se mantiene el mismo nivel de eficiencia en el uso del agua. | No se implementan incentivos y se incrementa el uso del agua disminuyendo el nivel de eficiencia en el uso del agua. |

| Optimista o de mínimo uso de agua | Tendencial o medio | Pesimista o de máximo uso de agua |
|---|---|---|
| Aumento del control sobre la micromedición, incrementando su cobertura y castigando el desperdicio, por lo que se disminuyen las pérdidas de agua. | Continúa el mismo nivel de micromedición, con el mismo nivel de pérdidas. | La política pública no hace nada y continúa el mismo nivel de micromedición, pero con un incremento en el nivel de pérdidas. |
| Los sectores productivos incluyen en el consumo intermedio los costos reales del uso del agua y hay un incentivo para aumentar el uso eficiente. | Los sectores productivos incluyen solo parcialmente los costos reales del uso del agua y hay un incentivo débil para aumentar el uso eficiente. | Los sectores productivos no incluyen los costos reales del uso del agua o se incluye un costo que no representa la condición real de disponibilidad del agua en la cuenca; por lo tanto, no hay un incentivo para aumentar el uso eficiente. |
| Instrumentos económicos, como tasa por uso de agua y tasa retributiva, son adoptados e implementados con alto nivel de eficacia por parte de las autoridades ambientales. Existe un claro incentivo para aumentar uso eficiente. | Instrumentos económicos, como tasa por uso de agua y tasa retributiva, son adoptados, pero cuentan con implementación irregular y con nivel medio de eficacia por parte de las autoridades ambientales. Existe un incentivo débil para aumentar el uso eficiente. | Instrumentos económicos, como tasa por uso de agua y tasa retributiva, se debilitan y hay una implementación pobre o nula por parte de las autoridades ambientales. No existe un incentivo para uso eficiente. |
| Aunque en Colombia la población crece a tasas bajas, se sigue concentrando en las grandes ciudades. Por efecto de la pandemia COVID-19, se espera que la concentración de población en las ciudades intermedias y pequeñas tenga una mayor tasa de crecimiento, y se mejore la gestión de las entidades prestadoras de servicio de acueducto, implementando la micromedición y, por lo tanto, el control de usos que hagan los hogares. Se mejora el acceso al agua potable. | | Aunque en Colombia la población crece a tasas bajas, se sigue concentrando en las grandes ciudades. Se espera que la concentración de población en las ciudades grandes continúe a tasas de crecimiento mayores, y que la gestión de las entidades prestadoras de servicio de acueducto no mejore ni ejerza control del uso que hacen los hogares. Se incrementan las brechas de acceso al agua potable. |

Se presentan a continuación los resultados de las proyecciones de los sectores.

### 7.5.1 Proyección demanda hídrica sector agrícola a 2040

Para el caso del sector agrícola, se partió por jerarquizar cultivos con base en la concentración de áreas de producción agrícola. Se priorizaron once (Tabla 61) y se incluyó la poscosecha para los cultivos de palma, café y banano. Los siete cultivos permanentes priorizados concentran el 87 % del total de la demanda hídrica agrícola de este tipo de cultivos; por su parte, los cuatro cultivos transitorios priorizados concentran el 92 % del total de la demanda hídrica agrícola de transitorios.

Tabla 61. Cultivos priorizados para proyecciones de demanda hídrica agrícola.

| Cultivo | Ciclo |
|---|---|
| Palma de aceite | Permanente |
| Yuca | Permanente |
| Caña azucarera | Permanente |
| Cacao | Permanente |
| Banano | Permanente |
| Aguacate | Permanente |
| Plátano | Permanente |
| Arroz riego | Transitorio |
| Maíz | Transitorio |
| Papa | Transitorio |
| Fríjol | Transitorio |

El procedimiento de estimación de la demanda hídrica proyectada para el sector agrícola desarrolló los siguientes pasos:

- Análisis de las metas establecidas por el Gobierno y los gremios en relación con las áreas sembradas y producción agrícola, complementado por el análisis del comportamiento futuro previsto con base en variables económicas.
- Estimación de modelos Arima y ADL para la proyección de producción y áreas de cada cultivo, eligiendo en cada caso el modelo con mejor ajuste estadístico.
- Generación de los modelos de dinámica de sistemas para áreas de cultivo.
- Elección de la proyección definitiva de áreas de cultivo. Este proceso se resume en comparar la proyección del modelo Arima y modelo de dinámica de sistemas con las metas sectoriales, y se elige el modelo con mejor ajuste.
- Cálculo de demanda hídrica con áreas proyectadas y bajo condición estimada de precipitación en año horizonte (Tabla 62), según escenarios de cambio climático.
- Consolidación de serie proyectada de demanda hídrica agrícola, incluyendo escenario de cambio climático al año 2040.

Para el cálculo de demanda hídrica con áreas proyectadas y bajo condición estimada de precipitación en año horizonte, se utilizan solamente los valores negativos de cambio en la precipitación que implican un escenario con una mayor restricción en el uso del agua en el futuro. Los departamentos que tienen un escenario de precipitación para 2040 con diferencias positivas (aumento esperado en la lluvia) se consideran en el modelo como un valor nulo; esto se debe a que cuando se tiene mayor o igual volumen de lluvia, la afectación real en la demanda agrícola es cero, ya que solo aumenta la necesidad de suplir con más agua de riego y, por tanto, mayor demanda hídrica agrícola, ante un teórico déficit de precipitación para abastecer el requerimiento hídrico de los cultivos.

Como se puede ver en la Tabla 62, se identifican dieciséis departamentos con un escenario previsto al año horizonte 2040 que implica una reducción de precipitación que va desde el -0,6 % para el Vichada hasta el 30,2 % para las islas de San Andrés y Providencia. En especial, vale resaltar los departamentos con alta incidencia agrícola y con alta concentración de áreas de cultivos que demandan riego: Bolívar, Cesar, Magdalena, Meta y Sucre, todos ellos con estimaciones de reducción que van desde -7,5 % hasta -18,7 % para los departamentos de Meta y Magdalena, respectivamente.

Tabla 62. Diferencia porcentual de precipitación estimada para escenario de cambio climático con horizonte 2040.

| | Diferencia % precipitación escenario 2040 | Diferencia % precipitación escenario 2040 para modelo uso agua agrícola |
|---|---|---|
| Amazonas | -14,8 % | -14,8 % |
| Antioquia | 4,9 % | 0,0 % |
| Arauca | 1,1 % | 0,0 % |
| Atlántico | -7,4 % | -7,4 % |
| Bolívar | -15,1 % | -15,1 % |
| Boyacá | 5,8 % | 0,0 % |
| Caldas | 20,2 % | 0,0 % |
| Caquetá | -19,0 % | -19,0 % |
| Casanare | -2,8 % | -2,8 % |
| Cauca | 16,2 % | 0,0 % |
| Cesar | -15,3 % | -15,3 % |
| Chocó | -5,2 % | -5,2 % |
| Córdoba | 1,6 % | 0,0 % |
| Cundinamarca | 8,0 % | 0,0 % |
| Guainía | -5,5 % | -5,5 % |
| Guaviare | -6,7 % | -6,7 % |
| Huila | 16,5 % | 0,0 % |
| La Guajira | -14,5 % | -14,5 % |
| Magdalena | -18,7 % | -18,7 % |
| Meta | -7,5 % | -7,5 % |
| Nariño | 13,7 % | 0,0 % |
| Norte de Santander | 1,0 % | 0,0 % |
| Putumayo | 4,5 % | 0,0 % |
| Quindío | 6,3 % | 0,0 % |
| Risaralda | 18,3 % | 0,0 % |
| Santander | 0,5 % | 0,0 % |
| Sucre | -11,3 % | -11,3 % |
| Tolima | 10,5 % | 0,0 % |
| Valle del Cauca | 6,6 % | 0,0 % |
| Vaupés | -20,5 % | -20,5 % |
| Vichada | -0,6 % | -0,6 % |
| San Andrés y Providencia | -30,2 % | -30,2 % |

Fuente: elaboración propia basado en Ideam, PNUD, MADS, DNP, Cancillería, 2015.

La Figura 209 permite visualizar el comportamiento de las proyecciones resultados de la demanda hídrica estimada por cultivo permanente e identifica la relevancia relativa de cada cultivo frente a la incidencia de los otros.

Como se puede ver, sobresale la demanda hídrica del cultivo de palma, la cual representa el 29 % de la demanda hídrica de todos los cultivos permanentes y el 8,9 % de la demanda hídrica total; esto tendrá una afectación importante de reducción de precipitación en zona de alta concentración de este cultivo, como son los departamentos de Magdalena y Meta, generando una proyección estimada de crecimiento en la demanda hídrica a 2040 de +49 %.

La Tabla 63 muestra el valor proyectado de la demanda hídrica para los principales cultivos permanentes.

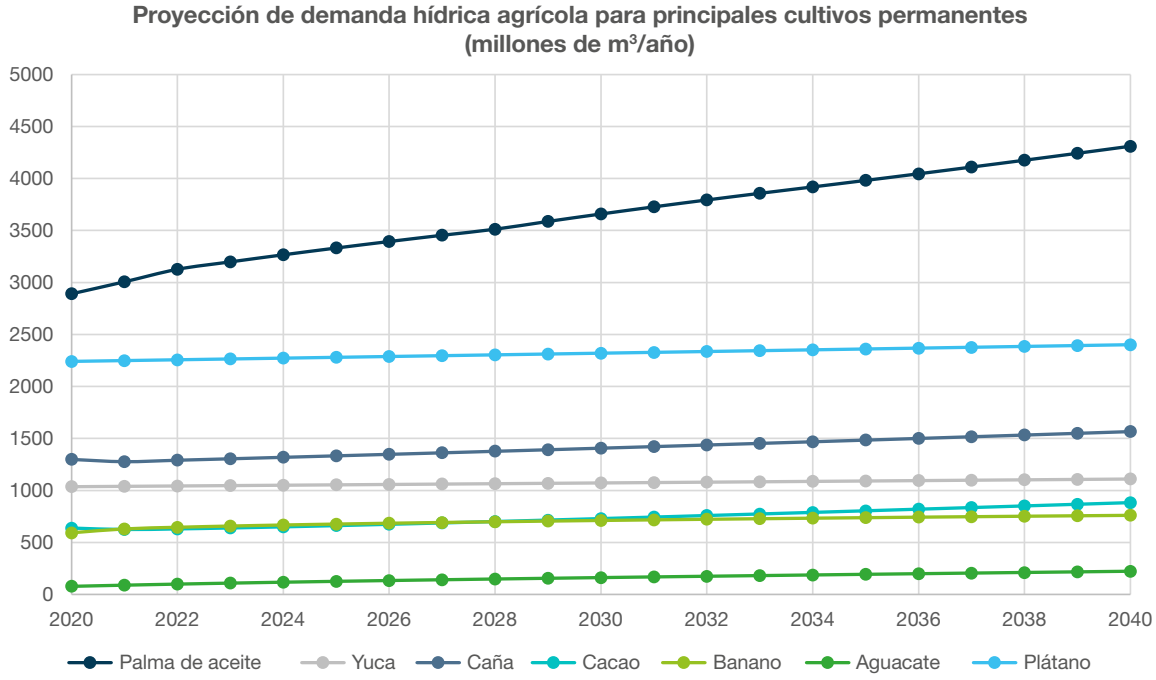



Figura 209. Proyección de demanda hídrica agrícola para principales cultivos permanentes (millones de m³/año).

Tabla 63. Valor proyectado quinquenal de demanda hídrica por cultivo permanente (millones de m³/año).

| Cultivo | Valor proyectado quinquenal de demanda hídrica por cultivo permanente (millones de m³/año) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 |
| Palma de aceite | 2891 | 3331 | 3658 | 3981 | 4309 |
| Yuca | 1036 | 1054 | 1073 | 1091 | 1110 |
| Caña | 1300 | 1334 | 1407 | 1485 | 1566 |
| Cacao | 639 | 662 | 729 | 804 | 883 |
| Banano | 592 | 676 | 711 | 738 | 761 |
| Aguacate | 79 | 126 | 162 | 193 | 222 |
| Plátano | 2241 | 2280 | 2319 | 2360 | 2401 |

Tanto la Figura 209 como la Tabla 63 reflejan los datos de las proyecciones de demanda hídrica para los principales cultivos permanentes que presentan crecimientos razonables; van desde proyecciones con crecimiento estimado muy bajo, como el caso de cultivos como plátano y yuca, con un crecimiento de demanda hídrica de +7 %, hasta crecimientos muy pronunciados como el esperado para el cultivo de aguacate, que se proyecta tenga un crecimiento en su demanda de agua de un +182 %. Estos crecimientos están especialmente relacionados con el resultado de la proyección de áreas de cultivo.

La Figura 210 permite visualizar el comportamiento de las proyecciones resultado de la demanda hídrica estimada por cultivos transitorios y hace posible identificar la relevante incidencia en la demanda hídrica del cultivo de arroz de riego, que representa el 69 % de la demanda hídrica de todos los cultivos transitorios y el 6,8 % de la demanda hídrica total.

**Proyección de demanda hídrica agrícola para principales cultivos transitorios (millones de m³/año)**

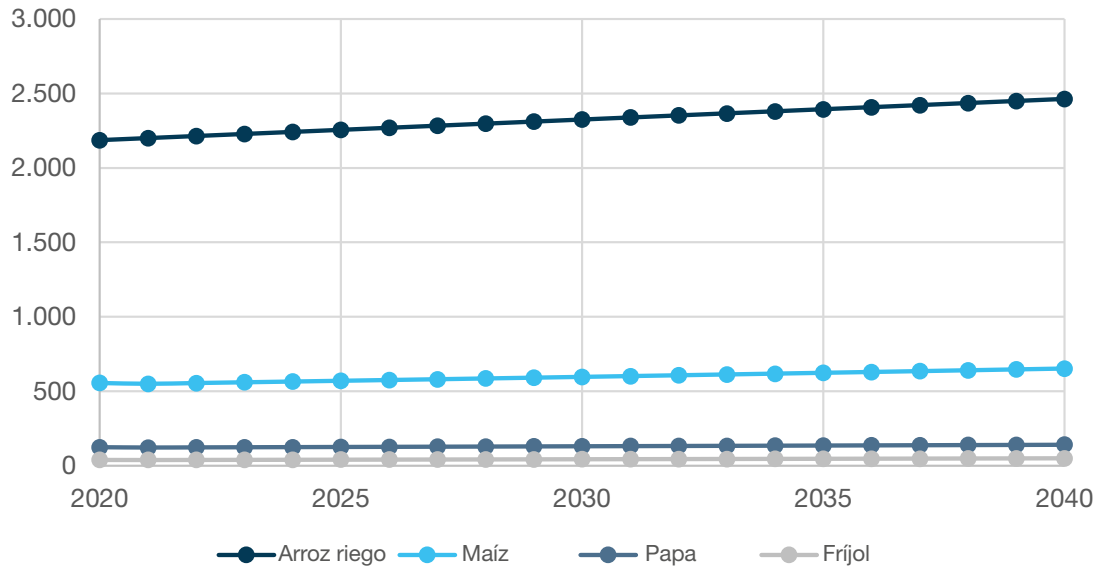



Figura 210. Proyección de demanda hídrica agrícola para principales cultivos transitorios (millones de m³/año).

El aumento estimado en la demanda hídrica se debe a un incremento de áreas de cultivo, dado que para este cultivo no se espera una alta afectación en demanda hídrica a causa del cambio climático, dado que su principal concentración se da en los departamentos de Tolima, Huila y Norte de Santander, y estos territorios cuentan con un escenario de no reducción de precipitación previsto para 2040.

La Tabla 64 muestra las proyecciones quinquenales de los principales cultivos transitorios. Las proyecciones de demanda hídrica para los principales cultivos transitorios presentan crecimientos razonables moderados que oscilan entre el +13 % para el arroz y el +25 % para el fríjol; estos crecimientos están especialmente relacionados con el resultado de la proyección de áreas de cultivo.

Completando las proyecciones de demanda hídrica del sector agrícola, se incluye el análisis de la poscosecha para los cultivos de palma, café y banano, el cual se presenta gráficamente en la Figura 211. Como se puede apreciar, se estima una proyección en la demanda hídrica que llegara a duplicar la demanda hídrica actual.

Tabla 64. Valor proyectado quinquenal de demanda hídrica por cultivo transitorio (millones de m³/año).

| Cultivo | Valor quinquenal de demanda hídrica proyectado por cultivo transitorio (millones de m³/año) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 |
| Arroz riego | 2185,7 | 2254,9 | 2324,0 | 2393,1 | 2462,2 |
| Maíz | 555,6 | 570,4 | 596,4 | 623,6 | 652,1 |
| Papa | 124,2 | 125,8 | 130,9 | 136,2 | 141,6 |
| Fríjol | 39,7 | 41,2 | 43,9 | 46,6 | 49,6 |

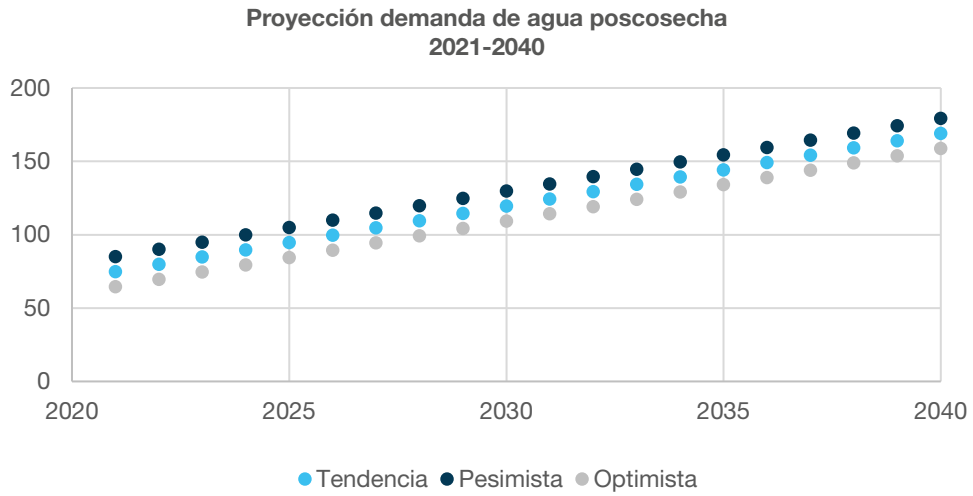



Figura 211. Proyección demanda de agua poscosecha. Escenarios 2021-2040.

## 7.5.2 Proyección demanda hídrica sector pecuario a 2040

El uso de agua proyectado acumula bovinos, porcinos y aves, e incluye tanto el agua usada por los animales como la utilizada en el sacrificio. El volumen oscila entre 2143 millones de m³ y 3348 millones de m³ a lo largo del periodo de 20 años, creciendo a una tasa anual de 2 % en promedio. En la Figura 212 se muestra las proyecciones de demanda hídrica anual del sector de 2021 a 2040.

De acuerdo con Fedesarrollo (Fedesarrollo, 2020), la tendencia del sector a la recuperación se evidencia en la aceleración del crecimiento a partir del tercer trimestre de 2020, que influye en el comportamiento de la proyección. Dice Fedesarrollo que la actividad pecuaria se aceleró frente al crecimiento observado en el trimestre anterior al incrementar 1,9 % (*vs*. -3,3 % en 2020-II). Esta dinámica se explicó por la mayor producción de ganado porcino (6,6 %), mientras que las actividades relacionadas con ganado bovino y aves de corral disminuyeron en 4,3 % y 6,3 %, respectivamente.

En cuanto al sacrificio de ganado, este resultó seriamente afectado por la pandemia, porque las cabezas de ganado sacrificadas se redujeron en cerca de 200.000 en 2020, representando una caída del 4,4 % en relación con el 2019; las medidas de cierre de restaurantes, hoteles y comercios fueron la principal causa de la disminución. El histórico para el sacrificio se vio fuertemente afectado por la pandemia, y presentó las primeras señales de recuperación en septiembre de 2020. En 2021, la recuperación por demanda local tuvo incrementos importantes, sumado a los crecimientos de la demanda externa.

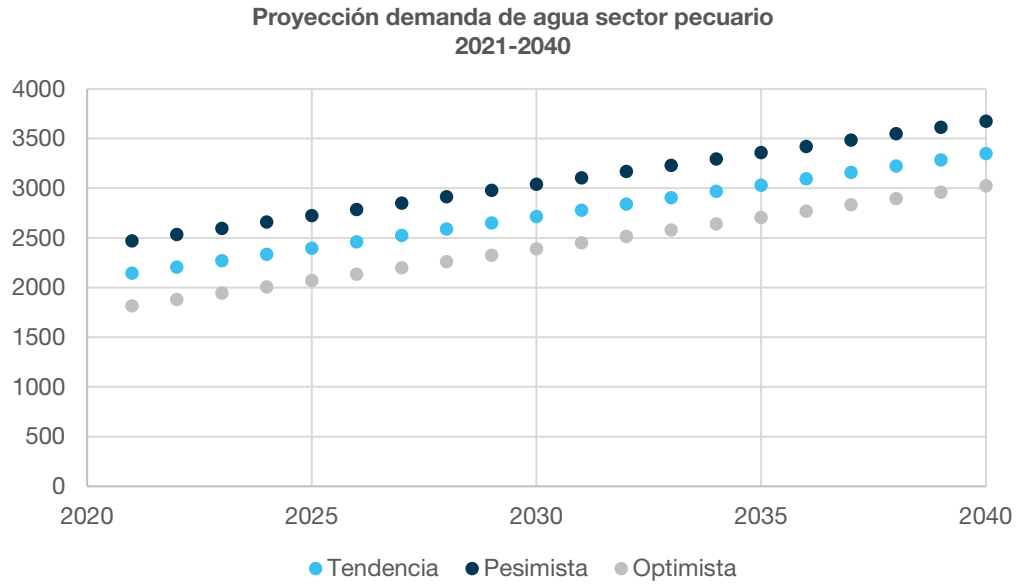



Figura 212. Proyección demanda de agua sector pecuario. Escenarios 2021-2040.

### 7.5.3 Proyección demanda hídrica sector hidrocarburos a 2040

El sector de hidrocarburos aumentará el uso de agua con una tendencia lenta. La proyección oscila entre 526,2 millones en 2021 y 569,7 millones de $m^3$ en 2040. De acuerdo con Fedesarrollo, en cuanto a las sendas de producción del petróleo en Colombia en el mediano plazo, las proyecciones se ajustaron levemente a la baja, consecuencia de la mayor incertidumbre sobre los efectos de la reforma tributaria y la rentabilidad en producción.

Las proyecciones anuales de demanda de agua del sector hidrocarburos de 2021 a 2040 se muestran en la gráfica de la Figura 213.

Es necesario prestar atención al curso de acción del sector ante las decisiones de política pública que pueden cambiar en los próximos 10 años la perspectiva de producción de petróleo. También hay que seguir el curso de acción de la política en cuanto a incentivar el reúso y la recirculación de agua en esta actividad, así como al mejoramiento de los registros de las empresas.

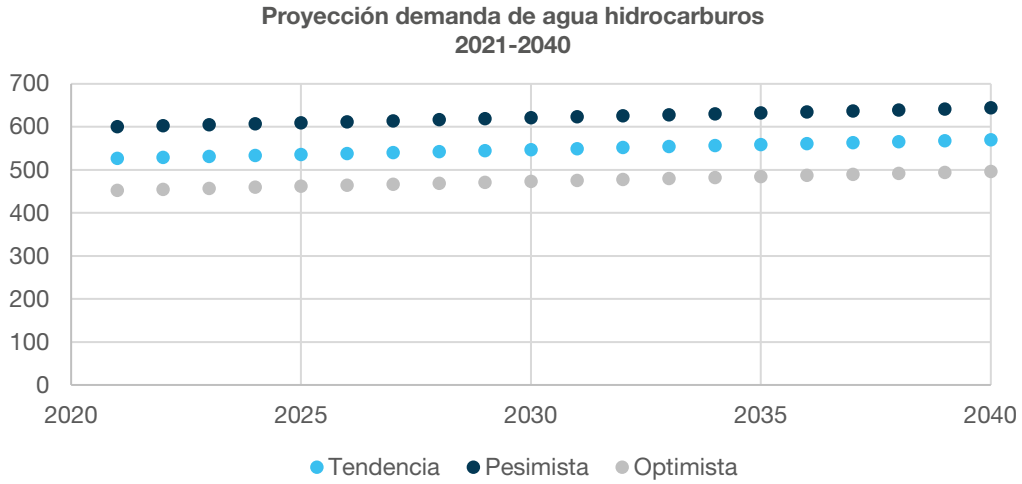



Figura 213. Proyecciones de demanda de agua del sector hidrocarburos. Escenarios 2021 - 2040.

### 7.5.4 Proyección demanda hídrica sector minero a 2040

Como se puede observar en la Figura 214, las proyecciones de uso de agua en minería de oro y carbón oscilarán entre 676,3 millones de $m^3$ y 855,3 millones de $m^3$ entre los años 2021 y 2040. Este resultado puede estar explicado por el comportamiento de los precios de mercado de los minerales en el exterior y la reactivación de los títulos de producción (Fedesarrollo, 2020).

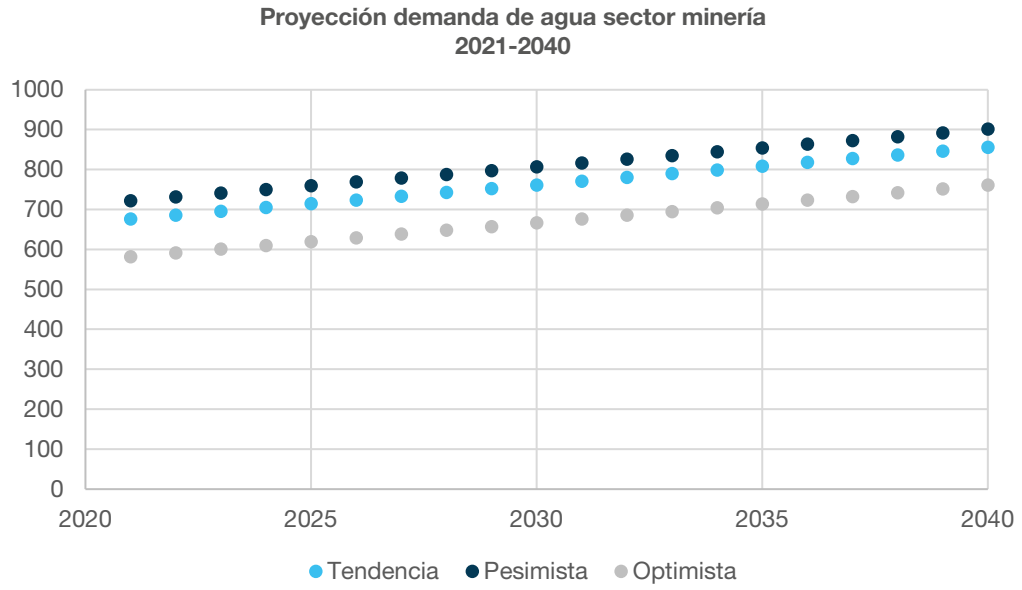



Figura 214. Proyecciones de demanda de agua sector minería. Escenarios 2021-2040.

### 7.5.5 Proyección demanda hídrica sector energía a 2040

Las proyecciones de uso de agua en las actividades de generación de energía hidro y termo se basa en el documento *Plan de expansión*[13] *de referencia generación-transmisión 2020-2034, Volumen 2. Generación* (UPME, 2021). El documento desarrolla la metodología utilizada; - después de contextualizar con diferentes factores económicos y de política - y define los criterios sobre los cuales construye diez escenarios de expansión en la generación, y dos escenarios de muy largo plazo. La información es procesada en el modelo energético *programación dinámica dual estocástica* para simular la operación de generación. Se procesan 200 series sintéticas de aportes hidrológicos que, bajo un proceso estadístico, al hacer pruebas comparando los resultados encontraron diferencias menores de 1 %.

Las proyecciones se elaboran con información existente a diciembre de 2019 e incluye las características de las plantas hidráulicas y térmicas y los índices de indisponibilidad históricos. Entre otras condiciones, los supuestos[14] consideran las características y condiciones de los embalses asociados a las plantas hidroeléctricas y su correspondiente topología, las capacidades de expansión por tecnología definidas a partir de proyectos inscritos en el registro de la UPME (fase 2 y 3) y otros que cuentan con estudio de conexión radicado o aprobado, entre otras (UPME, 2020).

Los diez escenarios se construyen[15] modificando la capacidad de generación hidro que pasaría de 1200 MW (megavatios) a 2825 MW entre 2019 y 2033; las modificaciones en la expansión adicional consideran la entrada de Hidroituango, la capacidad de

[13] Este plan tiene por objetivo «proveer información y señales de mediano y largo plazo a los interesados, sobre la inversión en energía eléctrica requerida para garantizar un suministro confiable, económico, sostenible y eficiente de electricidad en el país».

[14] Todos los supuestos pueden consultarse en el documento referenciado de la UPME, Plan de expansión.

[15] La expansión de cada escenario se obtiene a partir de la minimización conjunta de los costos de inversión y operación, verificando el cumplimiento de los indicadores de confiabilidad, teniendo en consideración la diversidad y disponibilidad de los recursos energéticos con los que cuenta el país.

las demás tecnologías y, en algunos, considera la aplicación de la guía de caudal ambiental a nuevos proyectos. Cada escenario considera diferencias en el tiempo de entrada de Hidroituango, además de las antes descritas. El resultado de analizar los diez escenarios permite establecer que:

- La expansión adicional de todos los escenarios muestra una gran participación de recursos renovables, principalmente eólico y solar, debido a los menores costos que representan. La UPME propone escenarios alineados a la intención de desarrollar este tipo de proyectos en el país, justificado en el número de proyectos inscritos en el Registro de Proyectos de Generación y aquellos con conexión aprobada o en trámite ante la entidad. Estos resultados muestran concordancia con los objetivos de política pública que buscan una matriz de generación diversificada, complementaria y más limpia.

- Los diferentes escenarios no identifican participación adicional de térmicas, lo cual no quiere decir que estas no se requieran o no puedan ingresar al sistema, pues la generación es una actividad de libre iniciativa y que tiene varios incentivos para propiciar su desarrollo.

- Algunos escenarios presentan costos marginales mayores y mayor variabilidad ante los eventos de expansión evaluados. Esto conduce a incentivar el ingreso de generación adicional que tenga efectos sobre los costos y que sea complementaria a la producción con el recurso hídrico.

Presentan un modelo[16] del comportamiento de sedimentos de los embalses, como base para calcular el volumen total de estos. El análisis se llevó a cabo para veintiseis embalses del país: Sogamoso, El Quimbo, Chuza, Sisga, Neusa, Alto Anchicayá, Calima, Salvajina, San Lorenzo, Tominé, Ituango, Miel I, San Carlos, Urrá I, Chivor, Guavio, Porce III, Peñol, Prado, Riogrande II, Playas, Betania, Porce II, Troneras, Miraflores y Muña, utilizando los datos batimétricos disponibles más recientes (2019) para un periodo de 50 años, datos utilizados para las corridas del plan de expansión[17].

A partir del cálculo del volumen útil[18], se evidencia un comportamiento decreciente a 2033, debido al aumento de los sedimentos; esto hace necesario variar la tecnología, favoreciendo en particular la eólica y solar. De acuerdo con lo antes expuesto, la UPME estima que el volumen útil de los embalses será decreciente hasta 2034, como lo ilustra la Figura 215.

**Proyección de uso de agua en generación eléctrica.**
**Volumen útil de los embalses**

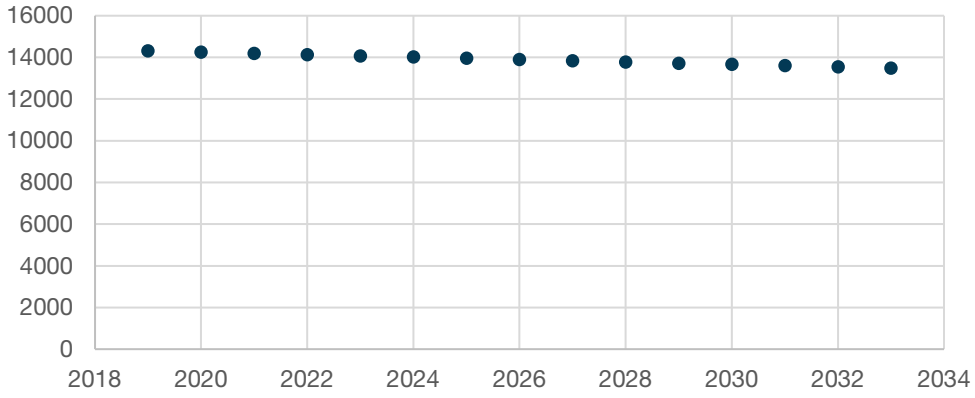



Figura 215. Proyecciones de agua embalsada 2019-2034. Elaborado con base en UPME, 2020.

[16] El cálculo se llevó a cabo con base en la teoría presentada en el Apéndice A del libro *Design of Small Dams*, del US Bureau of Reclamation, tercera edición (1987), citado por UPME.

[17] Clasifican los embalses con base en la magnitud de la sedimentación en función de la pérdida del volumen total y, finalmente, obtienen el volumen remanente, tanto el total como el útil, para cada uno de los embalses, teniendo en cuenta la fecha de realización de la batimetría más reciente. El estudio ilustra el procedimiento realizado para cada embalse y luego muestra dicho análisis para el total de embalses con las proyecciones de los volúmenes útiles.

[18] Se entiende por *volumen útil* el volumen de agua resultante de la diferencia entre el máximo físico y el nivel mínimo físico del embalse (R. CREG-025-1995; Anexo).

La evolución de la demanda ante la nueva realidad luego de la pandemia y el progreso en la incorporación de nuevas obras de generación de energía eléctrica —sobre lo cual existe gran expectativa por la cantidad de conexiones aprobadas y solicitudes realizadas— determinarán la participación de recursos renovables, principalmente eólico y solar, lo cual responde a los costos de inversión y operación de estas fuentes. Aunque la expansión representa el resultado de un proceso de optimización de inversión y operación del Sistema Interconectado Nacional (SIN), está muy alineado con la intención de desarrollar este tipo de proyectos en el país, en concordancia con los objetivos de política pública que buscan una matriz de generación diversificada, complementaria y más limpia.

En relación con las termoeléctricas, en la Figura 216 se muestran las proyecciones anuales (2021-2040) para los tres escenarios.

Se prevé que las térmicas reduzcan el uso de agua por la transformación tecnológica que se ha venido implementando, así como por el incentivo para la expansión de las energías alternativas. Se espera que las termoeléctricas disminuyan el uso de agua en 338,7 millones de $m^3$.

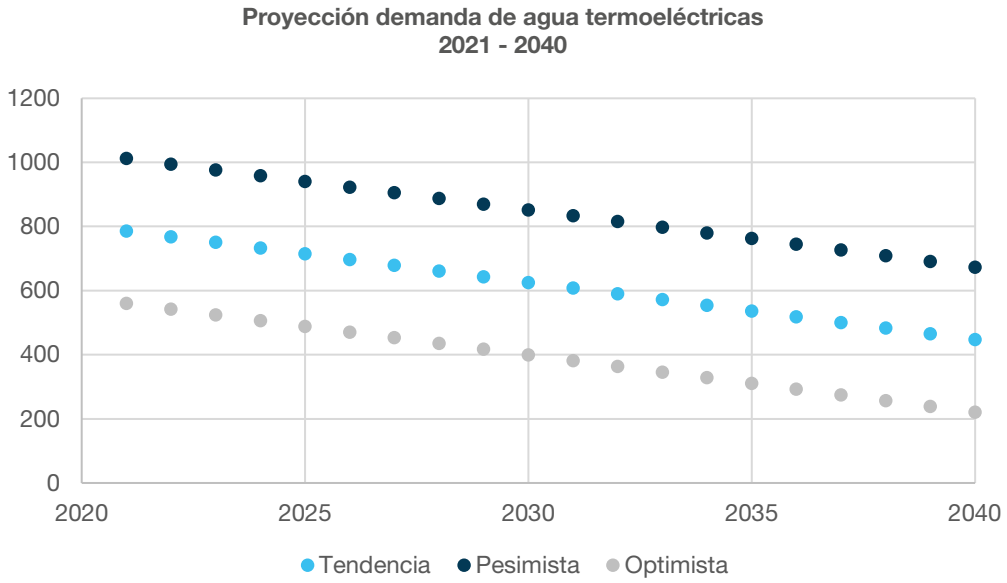



Figura 216. Proyecciones de demanda de agua de termoeléctricas. Escenarios 2021-2040.

## 7.5.6 Proyección demanda hídrica sector servicios a 2040

Se prevé que el comportamiento del uso de agua en servicios durante el periodo de proyección se comporte con una tendencia creciente que oscile entre 272,19 millones de $m^3$ y 290,09 millones de $m^3$ con una tasa promedio de 0,3 %, como se puede observar en la Figura 217 (proyecciones de demanda hídrica 2021-2040). Este fue uno de los sectores más afectados por la pandemia debido a los cierres de los establecimientos; sin embargo, es uno de los que después del periodo de pandemia ha venido en un proceso de recuperación gradual.

La Encuesta Mensual de Servicios (EMS) reportó que los ingresos nominales de las actividades de restaurantes, *catering* y bares tuvieron contracciones muy fuertes llegando hasta menos del 49,8 %. Sin embargo, una vez establecidos los protocolos para el consumo dentro de los establecimientos, permitió un incremento en los ingresos, pero en niveles inferiores a 2019. El mismo comportamiento se presentó en la hotelería. En 2020, los colegios y las universidades continuaron en actividades virtuales y los hospitales tuvieron los picos más altos de ocupación por el COVID-19. Estos factores afectaron el comportamiento del sector y explicaron la tendencia creciente, pero lenta, durante todo el periodo.

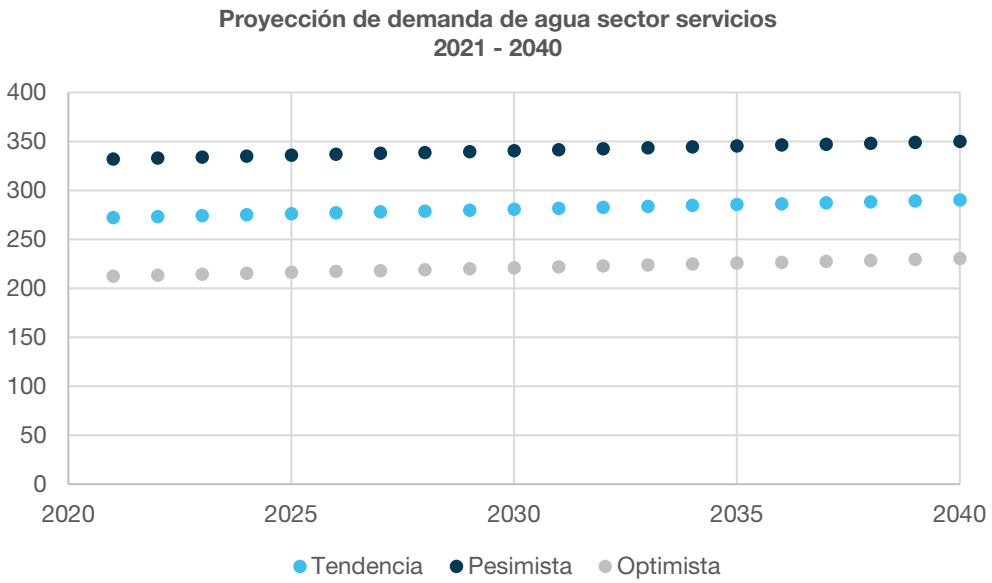



Figura 217. Proyecciones de demanda de agua, sector servicios. Escenarios 2021-2040.

### 7.5.7 Proyección demanda hídrica uso de agua doméstica a 2040

El comportamiento del uso de agua doméstica para el periodo de referencia se espera que oscile entre 2861,9 millones de $m^3$ y 3016,4 millones de $m^3$, como se puede observar en el gráfico de la Figura 218.

La tendencia de la demanda de agua es creciente debido al aumento de la población. Sin embargo, al igual que se estableció en el ENA 2018, la promoción del consumo eficiente de agua en las actividades domésticas y el desarrollo de estrategias para lograrlo influye en la moderación del uso de agua. El desincentivo para el uso excesivo del agua establecido por la resolución 726 de 2015 de la CRA continuará teniendo efectos positivos en la reducción del uso de agua por suscriptor.

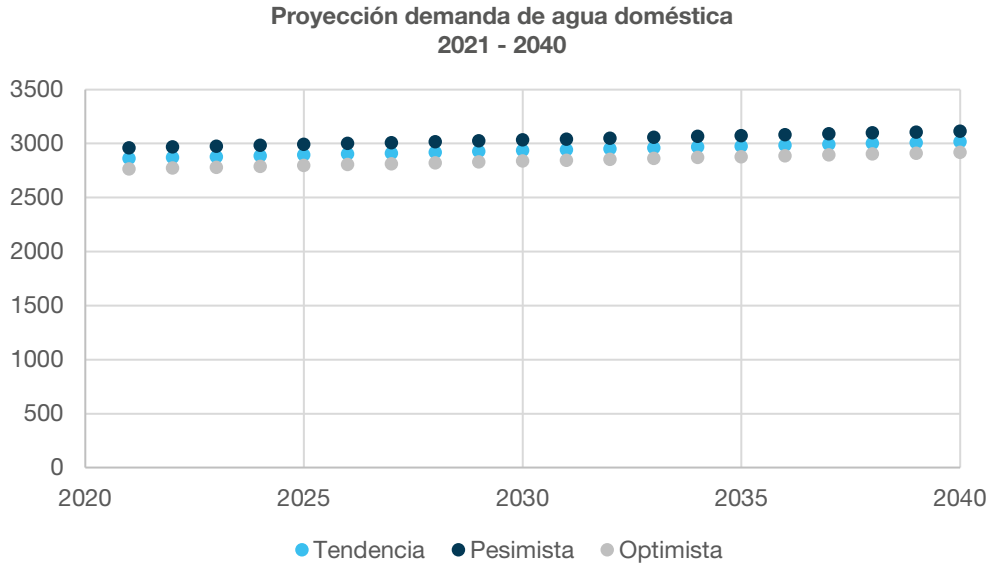



Figura 218. Proyecciones demanda de agua doméstica. Escenarios 2021-2040.

## 7.6 Consideraciones sobre los usos del agua en Colombia

Se presentan a continuación algunas consideraciones finales del capítulo, las cuales han sido agrupadas temáticamente, de forma que reflejen el proceso de recolección, análisis y uso de la información base; reflexionen sobre los resultados sectoriales, territoriales y nacionales; y, por último, planteen algunas oportunidades que quedan explícitas a partir de este Estudio Nacional del Agua.

### Calidad de la información y estabilidad de las fuentes

- Persiste la necesidad de consolidar y unificar fuentes, y de mejorar la coherencia y estabilidad metodológica y conceptual en las fuentes de información oficial y disponible sobre los usos sectoriales del agua.

- El Estudio Nacional del Agua realiza un riguroso análisis de calidad de cada dato base asociado a la coherencia y análisis de origen metodológico y conceptual que permite generar análisis y resultados con el menor nivel de incertidumbre posible. No obstante, existen sectores que cuentan con fuentes diversas y no coincidentes, en ocasiones por cambios relacionados con metodología o conceptos; mejorar esta situación genera dos impactos positivos principales en futuros estudios: (1) menor desgaste en análisis de fuentes de información diversas buscando o concertando el dato con menor incertidumbre; y (2) mejor información y resultados sectoriales con bajo nivel de incertidumbre, trasladado a la posibilidad de toma de decisión en territorios con presencia sectorial.

- La mejora continua de la información base en cantidad, calidad y cobertura abre una oportunidad asociada a la responsabilidad de los usuarios directos del agua y de los sectores a generar protocolos estables para la captura y el análisis de información sectorial; esta debe estar disponible para el correcto análisis territorial y posterior toma de decisiones orientadas a mejorar los indicadores de estado, presión y riesgo de los territorios.

- Aún son notorias las debilidades en la estabilidad de las metodologías, robustez de las estadísticas y subregistro en los reportes de uso del agua generados en instrumentos del SINA, como el SIRH y el RUA, y bases de datos de las *tasas por uso del agua*.

### Resultados sectoriales, territoriales y nacionales

- Los resultados sectoriales, territoriales y nacionales resultan coherentes al comportamiento histórico; resaltan algunos comportamientos tendenciales que hacen posible identificar cambios de comportamiento multianuales en la matriz general de uso del agua.

- Se identifica una reducción en el uso de agua azul del sector agrícola (demanda hídrica y huella hídrica azul), lo cual se explica por los siguientes factores: (a) cambios metodológicos en la estadística agrícola, con alto impacto en el análisis de áreas de pastos a nivel nacional; (b) alta dependencia del análisis y resultados asociados al comportamiento del clima, lo que implica que el uso de agua azul del sector agrícola (demanda hídrica y huella hídrica azul) podría bajar aunque las áreas de cultivo aumenten, si se analiza un año muy lluvioso; (c) se dispone de nueva información relacionada con riego a nivel nacional, lo que implica que se tiene un cálculo más ajustado a la realidad del uso del agua agrícola.

- Se resalta el trabajo articulado que se ha desarrollado con la UPRA para el análisis del uso de agua agrícola, lo cual ha permitido continuar con el proceso de mejoramiento continuo de cifras de áreas sembradas que son la base para el cálculo de requerimiento hídrico de cultivos.

- Continúa existiendo un campo de trabajo amplio con oportunidades de mejora que se centra en el uso de agua real de los sistemas de riego en el contexto nacional, lo cual permitirá en el futuro reducir el nivel de incertidumbre de los resultados de uso de agua agrícola, pasando de demanda requerida a demanda real.

- Los usos de agua no agrícolas calculados para 2020 en algunos sectores presentan cambios significativos en relación con el año 2016, que coinciden con los siguientes factores principales: (1) mejoramiento en la eficiencia en el uso de agua; (2) efectos de la pandemia en el año analizado; (3) cambios y complementos en la fuente de datos con más y mejor información para algunos sectores, por ejemplo, industria, doméstico e hidrocarburos.

- Existen sectores que aún presentan importantes limitaciones en la generación y disponibilidad de información; se resalta el caso del sector construcción, que tiene una gran oportunidad de mejora en la generación y el análisis de sus usos de agua.

- Las proyecciones se presentan segmentadas por la baja calidad de información de algunos sectores, lo que impide generar un valor consolidado nacional, y deja abierta la posibilidad de profundizar y precisar el resultado de las proyecciones.

- La coincidencia de año horizonte entre los resultados de proyecciones y los resultados disponibles de cambio climático ha permitido ajustar el modelo de cálculo con un nuevo argumento de alta incidencia técnica.

## Oportunidades de corto plazo

- Con el análisis de evolución del concepto de demanda y conceptos derivados, se evidencia la importancia de actualización coordinada del marco normativo que utiliza estos conceptos. La falta de coherencia entre los decretos que determinan la metodología de TUA —que no se han actualizado en temas como la demanda e índice de escasez desde 2004, y la evolución nominal, conceptual y metodológica de los usos del agua e indicadores en los sucesivos estudios nacionales del agua— ha generado una brecha técnica entre la evaluación del estado del recurso hídrico y la aplicación regional de los instrumentos económicos que tienen como propósito regular los usos.

- Sigue identificándose la oportunidad de mantener revisión y análisis continuos de la metodología de estimación sectorial de usos del agua; en particular, se hace énfasis en el trabajo de actualización y mejoramiento continuo que debe mantenerse con los principales sectores usuarios del agua: sector agropecuario y sector de generación de energía.

- A partir de los resultados en los niveles nacional y regional, por departamento y subzona hidrográfica, se hace evidente la necesidad de fortalecer y consolidar los instrumentos regionales que permitan bajar la escala de los resultados del Estudio Nacional del Agua. En particular, se menciona la Evaluación Regional del Agua (ERA), que es la herramienta idónea para dar continuidad regional y mayor nivel de detalle a los resultados del ENA.

- A partir de los resultados sectoriales, se identifica la oportunidad de generar análisis detallados subsectoriales que permitan obtener detalles que quedan ocultos en el resultado consolidado. Se identifica, en particular, la oportunidad de generar espacios de trabajo individuales con los principales gremios agrícolas, de forma que se pueda analizar el uso específico del agua para las actividades productivas de los principales productos y procesos, agrícola y poscosecha, con sus singularidades y diferencias regionales.

- Se identifica el reúso del agua como una potencial actividad que podría generar alto impacto en la condición de presión por uso de agua de un territorio. No obstante, aún no existe información consolidada respecto al nivel de implementación de procesos de circularidad en uso de agua. Esta información será de alta relevancia para futuros estudios nacionales del agua y análisis a escala regional.

- El uso conjunto de agua superficial y agua subterránea debe considerarse para reducir los consumos de agua superficial en áreas de alta criticidad por presiones por uso y contaminación. En este sentido, se debe mejorar el conocimiento de los sistemas acuíferos para determinar oportunidades de aprovechamiento de extracción por pozos profundos y de recarga artificial.



**Foto por:**
Claudia Yanet Contreras Trujillo
Río Cravo Sur, Yopal, Casanare

# CALIDAD DEL AGUA EN COLOMBIA

**Autores:**

**IDEAM:**
Claudia Nicol Tetay Botia

**CTA/GSI/HH:**
Juan Esteban González Valencia

**INS:**
Omayda Cárdenas Bustamante
Diana Patricia Díaz Jiménez
Gerardo Nava Tovar
Carlos Andrés Castañeda Orjuela

CAPÍTULO 8

# 8. Calidad del agua en Colombia

En la actualización del Estudio Nacional del Agua ENA 2022, el componente de calidad del agua presenta la evaluación del estado de la calidad del recurso y la presión por vertimientos a las fuentes hídricas superficiales en Colombia, en función de dos indicadores ante todo: el *índice de calidad del agua* (ICA) y el *índice de alteración potencial de la calidad del agua* (IACAL).

Para la evaluación del estado, se analizan variables fisicoquímicas, metales pesados en sedimentos y el ICA, que se calcula por punto de monitoreo en una corriente lótica superficial a partir de información primaria obtenida de la Red de Referencia Nacional del Ideam (año 2021), de convenios (Ecopetrol - Ideam) y de datos de la red de calidad del agua sobre el río Cauca de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). Además se realiza la evaluación en la cuenca Río Bogotá con mayor resolución, con información de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR).

El IACAL se evalúa para el año 2020; utiliza información secundaria de los sectores: doméstico, beneficio de café, industria manufacturera (38 actividades económicas) y sacrificio de ganado. También se incluye información sobre uso de sustancias químicas —tanto en la agricultura como en el cultivo y procesamiento de coca como uso ilícito—, actividades con una potencial incidencia sobre la calidad de las fuentes hídricas.

Con relación al uso de mercurio, se presenta un cambio de enfoque respecto a los ENA anteriores, considerando la entrada en vigor de la Ley 1658/13, que prohíbe el uso de mercurio en la extracción legal de oro. En consecuencia, para el ENA 2022 se asume que la información que contiene la base de producción oficial de la UPME no utiliza mercurio en su proceso de extracción y beneficio. En el ENA 2022 se hace una descripción sobre la información y las plataformas que en la actualidad monitorean el uso de mercurio en la actividad minera y de los datos reportados por el Ejército de Colombia en términos de mercurio incautado. Finalmente, se informa el uso de plaguicidas en Colombia, con los aportes y los resultados de las investigaciones e información del programa de Vigilancia Epidemiológica de Plaguicidas Organofosforados y Carbamatos (VEO), de la Dirección de Redes en Salud Pública del Instituto Nacional de Salud para el periodo 2017-2021.

## 8.1 Aspectos conceptuales y metodológicos

Se mantienen los conceptos y las metodologías tanto para estado como para presión, donde el estado hace referencia a las condiciones de la calidad del agua que están dadas por sus características físicas, químicas y biológicas; y la presión representa los vertimientos generados por las actividades económicas y poblacionales que son descargados en las fuentes hídricas superficiales (Ideam, 2015).

### 8.1.1 Elementos conceptuales

El concepto de calidad del agua planteado para el ENA apropia la definición de la Directiva Europea del Agua, referenciada en el ENA 2018 (Ideam, 2019), que asume que es necesario proteger un cuerpo de agua más como un bien ambiental que como un recurso para ser explotado, y que su caracterización se hace no solo en función del uso.

La ONU, en su programa para el medio ambiente en el marco del indicador ODS 6.3.2 - Proporción de masas de agua de buena calidad ambiental, se refiere a la calidad del agua ambiental como el agua natural sin tratar en ríos, lagos y aguas subterráneas; y representa una combinación de influencias naturales junto con los impactos de todas las actividades antropogénicas (Martín Delgado, 2021).

En el capítulo sobre calidad del agua se plantea el concepto de *evaluación* propuesto por AEVAL en 2010, donde se define como el proceso sistémico de observación, medida, análisis e interpretación encaminado al conocimiento de una intervención pública, bien sea esta una política, un plan, un programa o un proyecto (Alcaldía Mayor de Bogotá D. C., 2019).

La Figura 219 —titulada «Evaluación del estado de calidad del agua y presión sobre el recurso hídrico»

(Ideam, 2019)— muestra el esquema con los elementos para la evaluación del estado y la presión que ejercen actividades económicas y sociales sobre el agua, y su incidencia en la calidad de las fuentes hídricas superficiales. En principio, se identifican los vertimientos puntuales y difusos provenientes de los sectores económicos que alteran las condiciones físicas, químicas y microbiológicas de las fuentes hídricas. Dichas alteraciones se estiman a partir del IACAL que considera las cargas vertidas y la capacidad potencial de las fuentes hídricas para asimilar la carga contaminante vertida en función de la oferta total en las SZH. Con el ICA, por otra parte, se evalúan directamente los cambios en sus condiciones de calidad en puntos específicos de las fuentes hídricas.




Figura 219. Evaluación del estado de calidad del agua y presión sobre el recurso hídrico. Modificado de ENA 2018 (Ideam, 2019).

En el ENA 2022, se evalúan las condiciones de calidad a través de características fisicoquímicas y procesos de alteración únicamente en cuerpos de agua superficial.

Se mantienen los conceptos de carga contaminante y agroquímicos mencionados en el ENA 2018 (Ideam, 2019, pp. 219-220), también las Recomendaciones Internacionales para las Estadísticas del Agua (RIEA) utilizadas en el ENA 2014 (Ideam, 2015, p. 243), además de los conceptos de presión ambiental, afectación potencial y sustancias peligrosas definidos en el ENA 2010 (Ideam, 2010, pp. 231-232).

### 8.1.2 Procedimiento metodológico general

Para la actualización del componente de calidad, se tiene como referente base la metodología establecida en los estudio nacionales del agua: 2010, 2014 y 2018, con modificaciones en función de la información disponible y mejoras en las metodologías basadas en estudios de los mismos sectores, tales como industria, doméstico, beneficio del café y mercurio. De igual manera, se realiza el análisis de una ventana regional con información de la CAR. En el esquema de la Figura 220, se muestra el procedimiento metodológico para la evaluación de la calidad del agua y presiones por contaminación.

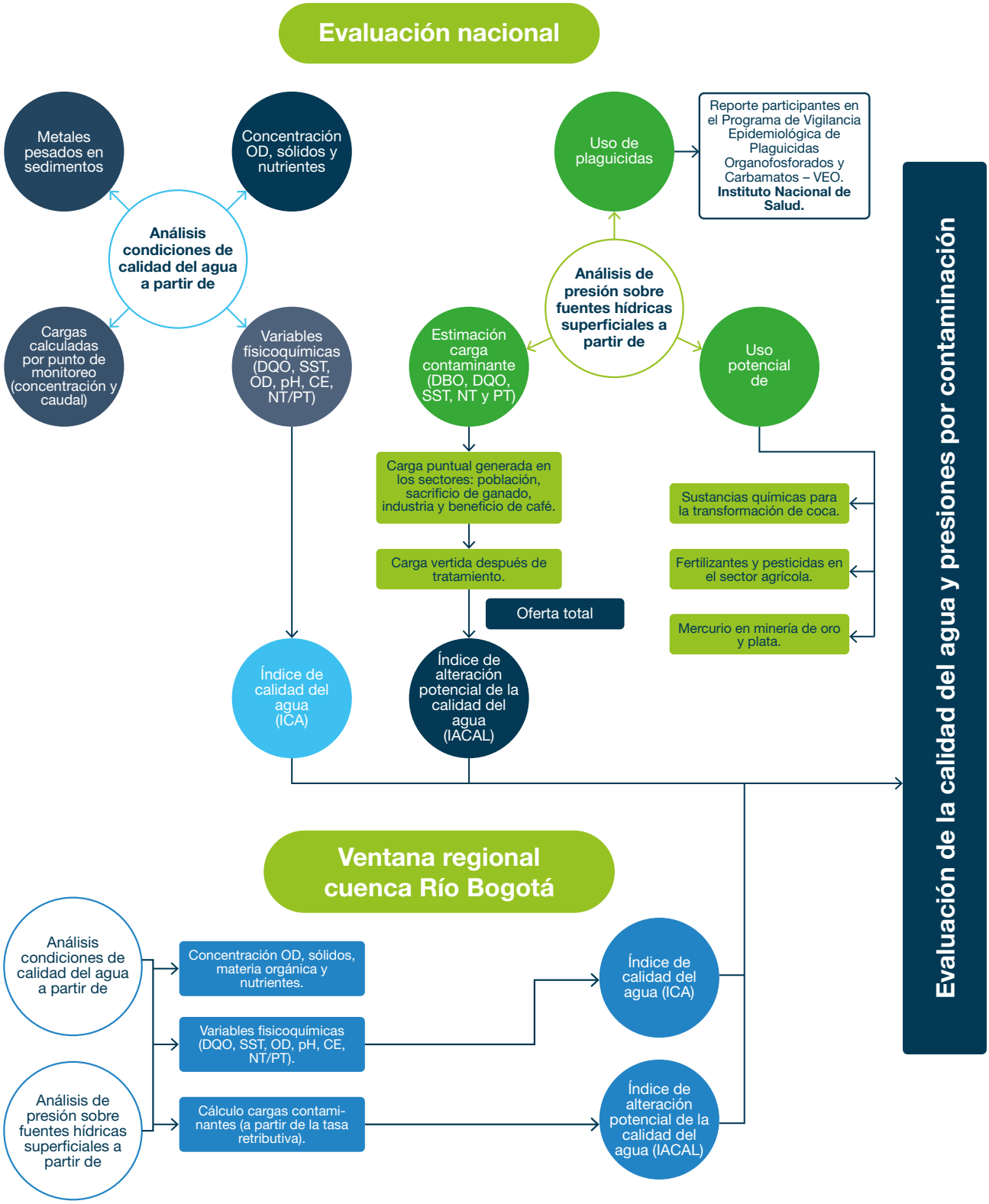



Figura 220. Procedimiento metodológico para la evaluación de la calidad del agua y presiones por contaminación (ENA 2022).

Las condiciones de calidad del agua se evalúan a partir del análisis de concentraciones de metales pesados en sedimentos, materia orgánica, nutrientes, cargas calculadas a partir de la concentración y el caudal, y del índice de calidad del agua (ICA). En el índice ICA se calculan seis variables relacionadas con: materia orgánica, sólidos suspendidos, y contenido de sales y nutrientes (DQO, SST, OD, pH, CE, NT/PT). En cuanto a la presión, se calculan a partir de cargas contaminantes vertidas (DBO, DQO, SST, NT, PT); uso de sustancias químicas en el procesamiento de coca; agroquímicos y mercurio en la minería de oro; del índice de alteración potencial de la calidad del agua (IACAL) y del uso de plaguicidas en Colombia según el programa de vigilancia epidemiológica VEO. Finalmente, evalúa la calidad de agua en la cuenca del Río Bogotá como ventana regional con información de una mayor resolución generada por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR).

## Condiciones de la calidad del agua

Para la evaluación de estado, se analizan variables fisicoquímicas, metales pesados en sedimentos y el ICA, que se calcula por punto de monitoreo en una corriente lótica superficial a partir de información primaria obtenida en 162 de estos, de los que 130 pertenecen a la Red de Referencia Nacional de Calidad del Agua, veinte a convenios y diecinueve hacen parte de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). De los diecinueve puntos de la CVC, siete coinciden con la Red Nacional. La evaluación en la cuenca Río Bogotá se realiza con 75 puntos de monitoreo.

El *índice de calidad del agua* es el valor numérico entre 0 y 1 que califica —en una de cinco categorías— la calidad del agua de una corriente superficial a la altura de un punto de monitoreo con base en las mediciones obtenidas para un conjunto de seis variables (DQO, SST, OD, pH, CE, NT/PT). La Tabla 65 presenta los rangos de valores del índice en categorías de calidad de agua, desde buena hasta muy mala. A estas categorías se les asocia un color como señal de alerta que indica el estado de la calidad del agua en la fecha y en el punto de monitoreo visitado.

Tabla 65. Categorización del índice de calidad del agua.

| Rango de valores | Categorización de la calidad del agua | Señal de alerta |
|---|---|---|
| 0,00 – 0,25 | Muy mala | Rojo |
| 0,26 – 0,50 | Mala | Naranja |
| 0,51 – 0,70 | Regular | Amarillo |
| 0,71 – 0,90 | Aceptable | Verde |
| 0,91 – 1,00 | Buena | Azul |

Cuando el resultado del ICA está dentro de las categorías «malo» y «muy malo», quiere decir que la concentración entre 3 y 6 variables del ICA es superior al rango establecido por el subíndice de la variable, por tanto, afecta las condiciones de la calidad del agua; es «regular» cuando la concentración está entre 2 y 3 variables; y «buena» o «aceptable» para 0 y 1 variable.

Por otro lado, se evalúan la concentración de metales pesados biodisponibles[1] —aluminio (Al), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), hierro (Fe), manganeso (Mn), níquel (Ni), plomo (Pb), mercurio (Hg), zinc (Zn)— de muestras tomadas en las campañas de monitoreo de calidad del agua para la Red de Referencia de Calidad del Agua del Ideam (Ideam e Invemar, 2021).

Adicionalmente, se calculan las cargas que transportan los ríos a partir de datos de concentración y caudal, medidos en los puntos de monitoreo en 2021, para demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales (ST), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT). Se analizan las concentraciones de otras variables de calidad tales como: carbono orgánico total, oxígeno disuelto, nitrógeno amoniacal y sólidos totales, y su afectación a las corrientes por condiciones de calidad.

## Presión sobre la calidad del agua

La estimación de carga contaminante se hace a partir de la actualización con datos de 2020 para los sectores doméstico (DANE, 2022) y de sacrificio de

[1]Se refiere a la concentración del metal pesado que se encuentra disponible para los organismos vivos y que puede ser tóxico a través de cadena trófica.

ganado (DANE, 2022), y con base en la consulta generada en los capítulos de producto y materia prima de la Encuesta Anual Manufacturera (EAM), en la sala de procesamiento especializado externo del DANE. Para la estimación de dicha carga, se utilizan los factores de vertimiento propuestos por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 1993) para los tres sectores, expresados en kg/unidad de producto/año. Como resultado, se obtiene la carga estimada (carga bruta) como valor indicativo de la presión que se ejerce sobre los sistemas hídricos a nivel de subzona hidrográfica. Para obtener la carga neta o carga vertida a las fuentes hídricas, se aplican los porcentajes de remoción por cada una de las actividades. El beneficio de café se basa en los estudios realizados por Cenicafé y la Federación Nacional de Cafeteros.

Estas estimaciones se constituyen en una alerta que da señales para hacer seguimiento a las condiciones de calidad del agua, profundizar en el análisis, mejorar estadísticas que soporten los cálculos o estimativos, y avanzar en contar con información más detallada, de mayor resolución y cobertura, georreferenciada y actualizada para focalizar acciones y gestión en los ámbitos regional y local.

### Sector doméstico

Se estimó la carga generada para el total de los municipios de Colombia. Para estimar la carga que vierte el sector doméstico, se utilizó la proyección de población del DANE junto con los factores de vertimiento de la OMS. En cuanto a la estimación de la carga vertida, se contó con la información de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD), que realizó la actualización para 2020 del SUI, con información de las empresas prestadoras de servicio a nivel nacional. Esta actualización incluye la medición antes y después de tratamiento de las concentraciones de DBO, DQO y SST. A partir de esta información, se obtienen las eficiencias y remoción de carga contaminante para el 30 % (84) del total de 354 municipios con información reportada con las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) a 2020; para los municipios restantes (70 %), se aplica la eficiencia utilizada en los estimativos del ENA 2018. En el caso de la carga vertida asociada con la población rural, se asume el uso de sistemas sépticos con una eficiencia de remoción adoptando un mismo factor, teniendo en cuenta información reportada en diferentes fuentes bibliográficas, como la Resolución 0330 de 2017 (Minvivienda, 2017) y la Guía metodológica para la implementación de soluciones individuales de saneamiento en zonas rurales (Alonso Ramos, 2021).

Para la carga vertida proveniente de las ciudades de Cartagena, Santa Marta y San Andrés, se descontó la carga removida asociada con el vertimiento a través de emisarios submarinos como sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas, como se hizo en el ENA 2018, ya que no se vierten a aguas continentales. En la Tabla 66, se presenta la información de los sistemas de las ciudades anteriormente mencionadas suministrada por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

Por otra parte, Barranquilla vierte un porcentaje de las aguas residuales tratadas al sistema lagunar costero (según Resolución 000580 de 2018 de la Corporación Autónoma Regional del Atlántico) y otro porcentaje al río Magdalena. Para la carga asociada con el vertimiento de aguas residuales continentales se tiene en cuenta solo el vertimiento que hace al río Magdalena la estación depuradora de aguas residuales EDAR Barranquillita.

### Sector industria

Para el sector industrial se utiliza la información de la Encuesta Anual Manufacturera de 2016 (DANE, 2018), a partir de la consulta por la Clasificación Internacional Industrial Uniforme (CIIU), revisión 4, adaptada para Colombia, CIIU rev. 4 A.C. y código del producto CPC (Clasificación Central de Productos). Con dicha información, se realizó una proyección[2] de las variables materia prima y producto por CPC y código CIIU a nivel de subzona hidrográfica para el año 2020, ya que por reserva estadística no se tiene acceso a los datos solicitados para realizar los cálculos necesarios para la estimación de carga generada por la industria. Para 2020, se cuenta con información de 6184 establecimientos, 38 actividades económicas y 1085 productos como producción de alimentos y bebidas, fabricación de textiles, curtido y preparado de cueros, transformación y fabricación

[2] Esta proyección se realizó con base en información disponible en el DANE respecto al comportamiento del sector económico en función de los códigos de productos (CPC).

Tabla 66. Información emisarios submarinos para tratamiento de aguas residuales domésticas.

| Departamento | Ciudad o municipio | Proyecto | Soporte autoridad ambiental |
|---|---|---|---|
| Magdalena | Santa Marta | Caudal medio de operación: 2500 litros por segundo (lps).<br><br>Disposición: 428 metros de longitud con un (1) metro de diámetro y una profundidad de 56 metros.<br><br>Puesta en funcionamiento: abril de 2000. | Resolución 242 de 1999: Ministerio de Ambiente otorga licencia ambiental al proyecto «Emisario submarino para tratamiento por dilución y disposición final de las aguas servidas de la ciudad de Santa Marta y permiso de vertimiento hasta por 2500 lps». |
| Bolívar | Cartagena | Caudal de operación: 4160 lps.<br><br>Tratamiento: planta de pretratamiento con militamices y desarenadores.<br><br>Disposición: efluente en un emisario submarino de 2 m de diámetro y 4,3 km de largo en el mar Caribe, a una profundidad de 21 m | Res. 345 de 2001: Cardique otorga licencia ambiental para el tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de Cartagena de Indias y para la disposición final del efluente al mar adyacente a través de emisario submarino. |
| San Andrés | San Andrés | Caudal medio de operación 140 y 240 LPS.<br><br>Disposición: efluente en un emisario submarino de 0,5 m a una profundidad aproximada de 21 m. | Resolución 507 del 20 de noviembre de 1997: la Corporación ambiental Coralina otorgó la licencia ambiental para la construcción del emisario submarino de carácter oceánico. |

de productos de madera, fabricación de papel, cartón y sus productos; fabricación de productos de la refinación del petróleo; fabricación de sustancias y productos químicos, y 199 materias primas que aportan carga contaminante a nivel de subzona hidrográfica.

Para la estimación de tratamiento de agua industrial se mantiene la metodología establecida en el ENA 2010 (p. 236), aplicada también en los ENA 2014 y 2018.

## Beneficio de café

La información de las cargas generadas y vertidas para el beneficio de café fue suministrada por la Federación Nacional de Cafeteros y Cenicafé[3], de acuerdo con los estudios que vienen realizando en las fincas cafeteras. Es importante aclarar que para este sector no se dispone aún de información sistematizada con relación al uso de sistemas de tratamiento de aguas residuales en el beneficio del café; por lo tanto, los resultados de carga vertida están en función del porcentaje de vertimientos que se realizan a las fuentes hídricas, que en promedio corresponde al 22,2 % del total de las cargas generadas, tal como lo indicó el profesional de Cenicafé que ha estado acompañando técnicamente la inclusión de estos resultados en el ENA 2022, dado que no se cuenta con documento de soporte. El 77,7 % de las

[3]Esta información fue suministrada por Nelson Rodríguez Valencia, el profesional de Cenicafé, por medio de correo electrónico. Los datos se obtuvieron de estudios realizados por Cenicafé y la Federación Nacional de Cafeteros con sus asociados.

aguas residuales restantes se disponen sobre suelo, por lo que se asume que no tienen un impacto directo sobre las fuentes hídricas.

### Sacrificio de ganado

Para esta versión del ENA 2022 se presentan cambios frente a la anterior edición ENA 2018: en primer lugar, es la inclusión del sacrificio bufalino para el que se asume un comportamiento similar al ganado bovino en términos de aporte de carga por animal sacrificado. En segundo lugar, de acuerdo con la normativa vigente para el sacrificio de ganado, los sitios de beneficio deben disponer de sistemas de tratamiento de aguas residuales propios; por lo tanto, se consultaron algunos sistemas empleados y sus respectivos porcentajes de remoción, esto con el fin de estimar la carga vertida por dicha actividad económica. Como base de información se dispone de la Encuesta de Sacrificio de Ganado (ESAG), que es liderada por el DANE.

### Vertimiento de mercurio por beneficio de oro y plata

Para el ENA 2022 se presenta un cambio de enfoque en esta temática. En el ENA 2018, se tuvo como base la producción oficial de oro reportada por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) y datos sobre uso de mercurio por distrito minero. Sin embargo, en el año 2017, con la entrada en vigor de la Ley 1658/13, se prohíbe el uso de mercurio en la actividad minera aurífera, por lo que se asume que la producción oficial de oro ya no usa mercurio para la extracción de este metal. En tal sentido, para el ENA 2022 ya no es posible utilizar la información reportada por la UPME, porque corresponde a una producción oficial de oro que en teoría ya no debe utilizar mercurio para su extracción.

Por tal razón, se realizó una búsqueda de información sobre el uso de mercurio y su incidencia en la calidad de las fuentes hídricas en Colombia; esto permitió identificar algunas instituciones y sus respectivas plataformas que reportan datos no sistemáticos de mediciones de mercurio en agua, suelos y relaves. También se tiene información sobre la cantidad de mercurio incautado en actividades mineras por las Fuerzas Militares de Colombia.

### Cargas vertidas por subzona hidrográfica

Se mantienen las categorías y los rangos asociados para la espacialización por subzona, teniendo en cuenta que la información proyectada de industria del DANE se hace por subzona hidrográfica para no afectar la reserva estadística. El análisis para 2020 de cargas vertidas no se tiene por municipio (como en los ENA 2010 y 2014), sino por SZH, como en el ENA 2018 (Ideam, 2019, p. 225).

## 8.2 Análisis de las condiciones de la calidad del agua en Colombia

Aunque se cuenta con información para el análisis de las condiciones de la calidad del agua de la red nacional —que ha tenido un proceso de fortalecimiento con redes regionales—, la información sigue siendo muy limitada en el país; por tanto, se requiere continuar con la formulación de los programas institucionales regionales del monitoreo del agua (Pirma) para fortalecer el monitoreo y estructurar un sistema que amplíe la cobertura temática y geográfica, y que se oriente a generar datos suficientes y adecuados para los diferentes niveles de planificación, gestión y toma de decisiones sobre el recurso hídrico.

Los resultados que se muestran a continuación son valores indicativos que dan cuenta de lo que puede estar ocurriendo en la corriente donde se encuentra el punto de monitoreo.

### 8.2.1 Cargas analizadas a la altura del punto de monitoreo

A partir de los resultados de concentración y caudal medidos durante el año 2021 en diecinueve puntos de monitoreo con información disponible de las variables, se presentan las cargas de demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales (ST), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT). En la Figura 221, se observa la variación de valores de cargas entre 5 y 30.000 t/día de DQO; entre 168 y 666.500 t/día de sólidos totales; entre 0,5 y 800 t/día de fósforo total; entre 0,1 y 700 t/día de nitrógeno total, y entre 8 y 5000 $m^3/s$ de caudal.

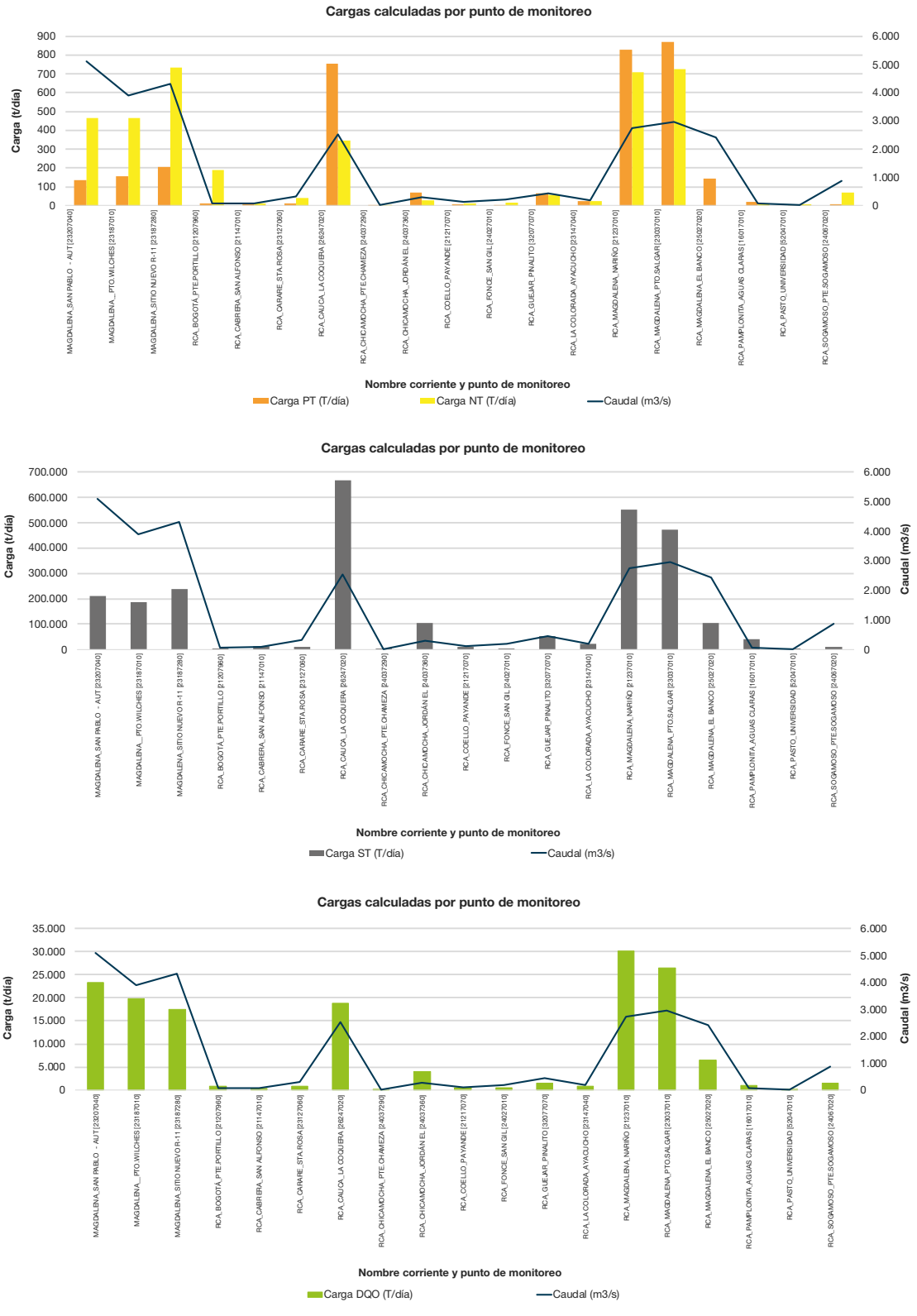



Figura 221. Cargas contaminantes de DQO, ST, NT y PT calculadas por punto de monitoreo.

En esta Figura 221, se identifican puntos de monitoreo con valores de cargas altas en los cuatro parámetros en el momento de la toma de muestra de calidad el agua y medición del caudal; dichos puntos están ubicados sobre el río Magdalena en los puntos Nariño y Puerto Salgar (en los municipios de Nariño y Puerto Salgar en Cundinamarca); y Puerto Wilches, Sitio Nuevo R-11 y San Pablo, ubicados en los municipios Puerto Wilches (Santander) y San Pablo (Bolívar). Y los sigue el punto La Coquera, sobre el río Cauca, ubicado a la altura del municipio de Caucasia, entre otros más.

### 8.2.2 Análisis de la calidad del agua a partir de la concentración analizada para carbono orgánico total, nitrógeno amoniacal, oxígeno disuelto y sólidos totales

En la Figura 222, se observan los puntos monitoreados en 2021. Cada uno de los mapas representa las concentraciones de carbono orgánico total, nitrógeno amoniacal, oxígeno disuelto y sólidos totales, variables que reflejan intervención antrópica por posibles vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales.

En el área hidrográfica del Caribe se monitorearon nueve puntos de la Red de Referencia Nacional de Calidad del Agua. En el punto Aguas Claras, ubicado a la altura del río Pamplonita, en el municipio de Cúcuta, se observa una concentración de 9,3 mg/l de carbono orgánico total; 4,6 mg/l de oxígeno disuelto y 6740 mg/l de sólidos totales, siendo uno de los puntos (de los nueve monitoreados) con mayores concentraciones de tres variables y menor valor en el caso de oxígeno disuelto.

En el área hidrográfica Magdalena-Cauca, se monitorearon 96 puntos de la Red de Referencia Nacional de Calidad del Agua. En puntos ubicados sobre el río Bogotá, a la altura de los municipios de Chía, Cota, Bogotá y Sibaté, se registraron concentraciones entre 0 y 2 mg/l de oxígeno disuelto; adicional a los anteriores municipios, en los puntos ubicados a la altura de Tocaima y Girardot, el carbono orgánico total se encuentra entre 14 y 20 mg/l, el nitrógeno amoniacal entre 9 y 19 mg/l y los sólidos totales entre 500 y 1200 mg/l.

En el área hidrográfica del Orinoco, se monitorearon diecisiete puntos de la Red de Referencia Nacional. En los puntos Puerto Rico, Puente Carretera, Piñalito, Puerto Inírida y Puente Lleras, ubicados sobre las corrientes Ariari, Guayuriba, Güejar, Inírida y Meta, se identificaron concentraciones entre 1500 y 4200 mg/l de sólidos totales, y entre 2 y 7 mg/l de carbono orgánico total.

En las áreas hidrográficas Amazonas y Pacífico se monitorearon diez puntos de la Red de Referencia, cinco en cada área. Dos de los puntos con mayores concentraciones en carbono orgánico total y sólidos totales son Bocatoma Centenario y Universidad, ubicados en Pasto (Nariño), donde las concentraciones se encontraron en 78,27 mg/l de COT y 1766 mg/l de ST; y en 25,4 mg/l de COT y 232 mg/l de ST, respectivamente.

### 8.2.3 Concentración de metales pesados en sedimentos

En 2021 se tomaron muestras de metales pesados en sedimentos en 136 puntos de monitoreo. Para realizar el análisis se identificaron los puntos con altas concentraciones en el total de los puntos monitoreados. De la revisión se seleccionaron dieciséis que presentan esta condición en más de cinco metales.

A continuación, se muestran los resultados de los dieciséis puntos con estas condiciones de valores altos en concentración de metales pesados en sedimentos. Los valores altos de cada uno de los metales analizados pueden ser debido a afectación por origen antrópico (industria, minería, aguas residuales domésticas, agricultura) o de origen natural, como zonas volcánicas o ríos de alta montaña. En el diagrama de la Figura 223 se muestran puntos y valores de concentración de níquel (Ni) y plomo (Pb), resultados de las mediciones en los puntos mencionados.

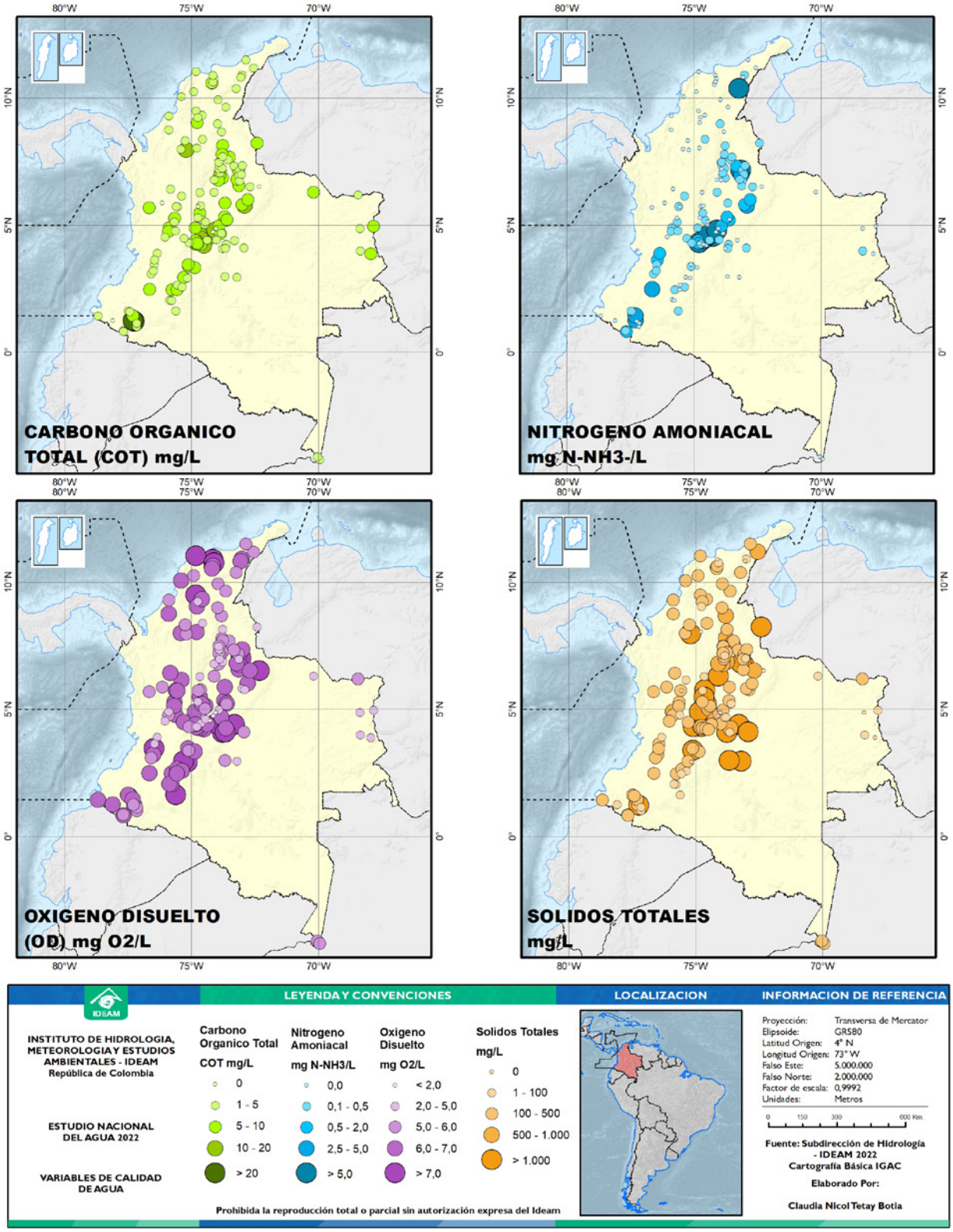



Figura 222. Variables de calidad del agua en los puntos de monitoreo a partir de concentración de carbono orgánico total, OD, nitrógeno amoniacal y sólidos totales.

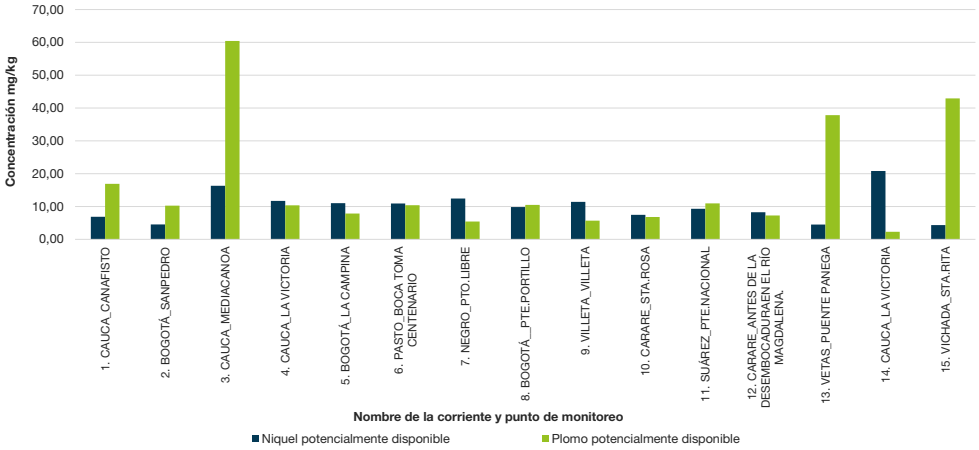



Figura 223. Concentración de níquel y plomo potencialmente biodisponible.

En la Figura 223 se observa que el níquel varía entre 4 y 20 mg/kg, registrando el mayor valor en el punto La Victoria (Valle del Cauca), sobre el río Cauca. Por otro lado, la concentración de plomo varían entre 5 y 60 mg/kg, con el mayor valor en el punto La Pintada, ubicado en el municipio de Aguadas (Caldas), sobre el río Cauca; lo sigue el punto Santa Rita, ubicado en el municipio de Cumaribo (departamento de Vichada) sobre la corriente Vichada, que registra un valor de 42,9 mg/kg. Estas concentraciones de níquel y plomo pueden darse por residuos sólidos que llegan a la corriente y que en su composición contienen níquel (Herrera N. et al., 2013).

Los valores de concentración de cobre (Cu) y cromo (Cr) potencialmente disponibles se muestran en la Figura 224, donde se puede observar que el cobre varía entre 9 y 84 mg/kg; el mayor valor se registra en la estación desembocadura río Quinamayo, a la altura del municipio de Santander de Quilichao, y el menor valor en la estación Puente, carretera La Mesa-Mesitas, en el municipio de Tena, sobre la corriente del río Bogotá.

En el punto de monitoreo San Pedro, sobre la corriente del río Bogotá, a la altura del municipio de Villapinzón, la concentración de cromo es de 210 mg/kg; y de 80,4 mg/kg en el punto Puente Tulio Botero, sobre el río Bogotá, a la altura del municipio de Tocancipá. Las concentraciones de cromo pueden darse por la agrupación de compuestos de cromo derivados de la minería del carbón, que por medio de la precipitación llegan a las corrientes (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2000); o de la industria manufacturera que usa diferentes tipos de colorantes cuyos residuos son vertidos igualmente a las corrientes de agua (Herrera N. et al., 2013).

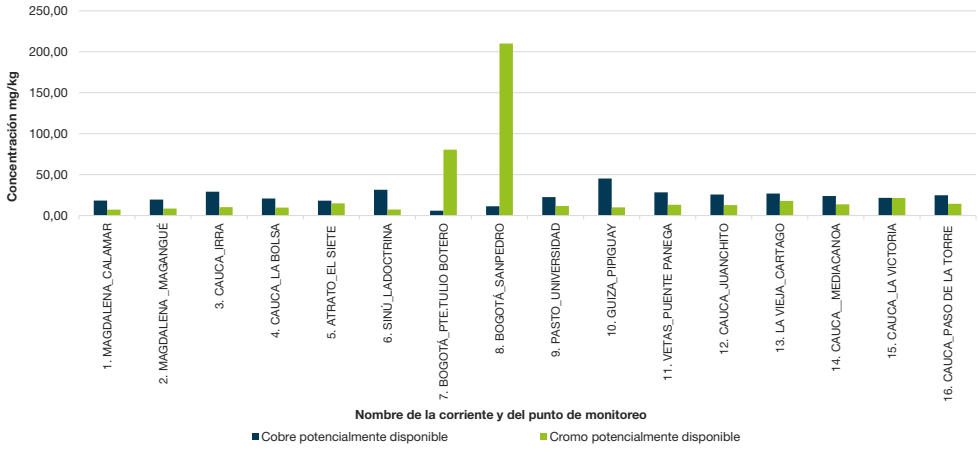



Figura 224. Concentración de cobre y cromo potencialmente biodisponible.

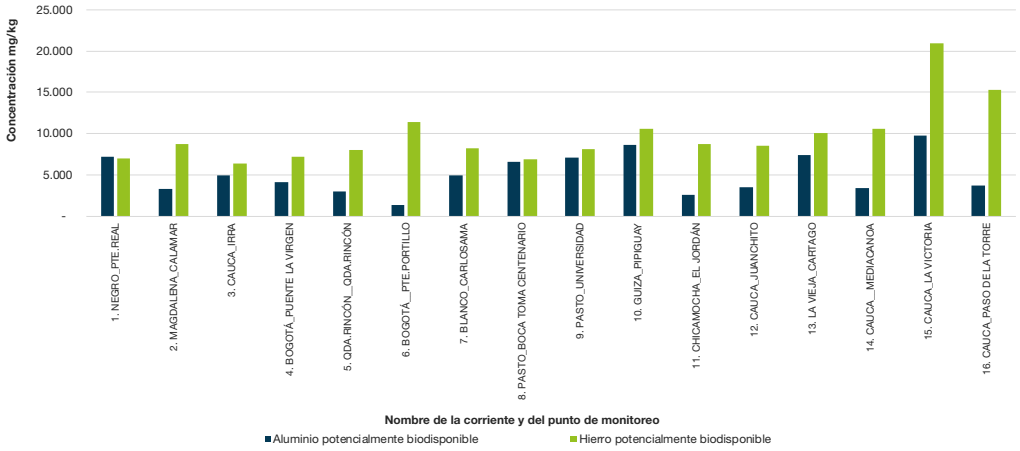



Figura 225. Concentración de aluminio y hierro potencialmente biodisponible.

La Figura 225 muestra los resultados de concentraciones de aluminio (Al) y hierro (Fe) potencialmente biodisponible.

El valor más alto en aluminio supera los 8000 mg/kg y se presenta en el punto La Victoria, sobre el río Cauca, al igual que el hierro, que supera los 20.000 mg/kg en el mismo punto. Los valores altos en hierro pueden darse por la geomorfología de los ríos o por aportes de derivados industriales.

Por otra parte, en la gráfica de la Figura 226 se presentan las concentraciones medidas de manganeso (Mg) y de zinc (Zn).

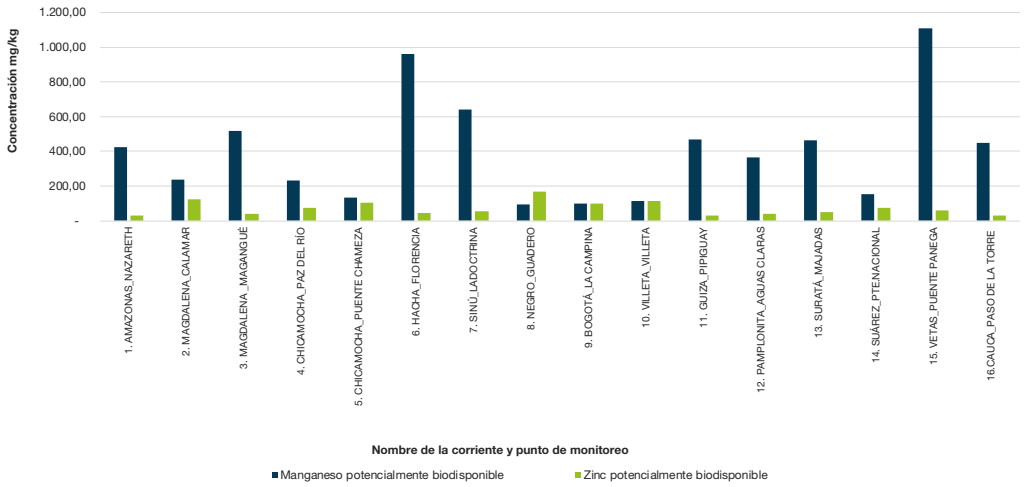



Figura 226. Concentración de manganeso y de zinc potencialmente biodisponible.

El mayor valor registrado en manganeso (Mg) es de 1110 mg/kg y es resultado de la medición en el punto Puente Panega, ubicado a la altura del municipio de Suratá (Santander), sobre la corriente del río Vetas; a diferencia del zinc (Zn), cuyo mayor registro se encuentra en el punto Guaduero, ubicado sobre el río Negro, a la altura del municipio de Caparrapí (Cundinamarca), en una concentración de 166,67 mg/kg. El aporte de manganeso y zinc se puede dar por la influencia minera, por residuos industriales o domésticos y por uso de agroquímicos.

La concentración de mercurio en sedimentos, medida en el año 2021 en las quince estaciones, se presenta en la gráfica de la Figura 227.

La concentración de mercurio no superó los 4,23 mg/kg. El mayor registro se presentó en el punto Puente La Virgen, sobre la corriente del río Bogotá, a la altura del municipio de Cota, seguido de los puntos: Majadas, ubicado sobre el río Surata en jurisdicción de la ciudad de Bucaramanga, con 3,40 mg/kg; Las Varas (1,61 mg/kg), sobre la corriente del Cauca, a la altura del municipio de San Jacinto del Cauca; y Puente Panega (1,42 mg/kg) sobre el río Vetas, a la altura del municipio de Suratá, en Santander. La concentración de mercurio se puede dar por origen natural o por origen antropogénico, por su uso para la minería o industria, entre otros.

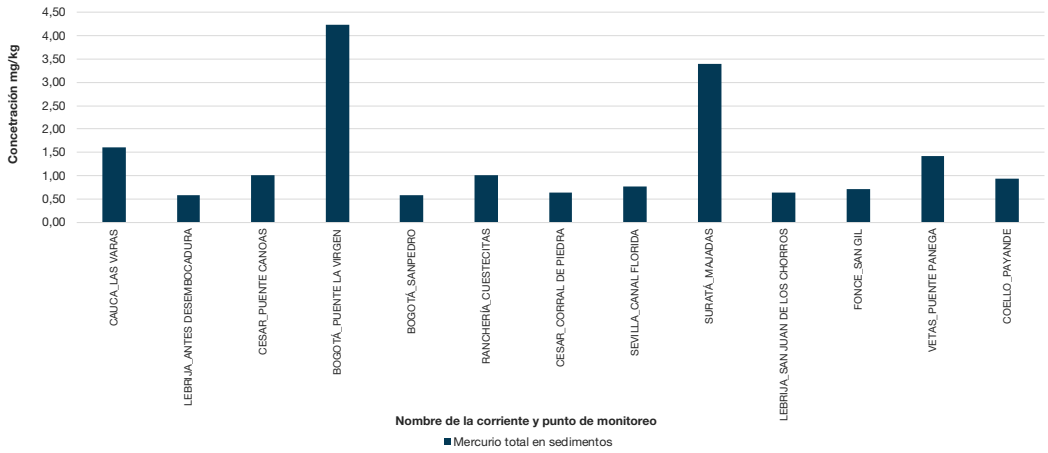



Figura 227. Concentración mercurio total en sedimentos.

## 8.2.4 Índice de calidad del agua

El *índice de calidad del agua* (ICA) permite el análisis y seguimiento de las condiciones de calidad a partir de los datos generados en puntos de monitoreo ubicados sobre corrientes hídricas, seleccionados en programas de monitoreo. En 2021, el ICA se calcula con las mediciones de las seis variables (OD, DQO, SST, CE, pH, relación NT/PT) representativas de los principales contaminantes, teniendo en cuenta información recolectada a partir de 305 monitoreos realizados en 162 puntos.

La mayoría de los puntos de monitoreo se concentran en el área hidrográfica Magdalena-Cauca, con el 78 %; en los ríos del área Caribe se alcanza el 5 %; y entre las áreas hidrográficas del Pacífico, Amazonas y Orinoquía solo suman 17 % del total de puntos.

En el mapa de la Figura 228 se observan los resultados de ICA para los 162 puntos de monitoreo, y la calidad de agua según la categorización del índice y las variables que inciden en esta.

De acuerdo con los resultados de los monitoreos en 2021, el descriptor del indicador va de «bueno» a «malo», sin encontrarse ningún punto con categoría de «muy malo».

Con descriptor «malo» se encuentran las corrientes Bogotá, Magdalena, Lebrija, Opón, Pamplonita, Negro, Sogamoso, Villeta, Guayuriba, Güejar, La Vieja y Lagunilla, entre otras, a la altura de los puntos de monitoreo como se observa en la Tabla 67.

Los resultados que se presentan a continuación se basan en el ICA promedio anual, calculado a partir de las mediciones realizadas en los ríos Magdalena y Cauca durante 2021; para los ríos Bogotá y Chicamocha se realiza la comparación de los ICA promedio de los años 2013, 2016 y 2021. Las figuras que se comparten de cada una de las corrientes representan el resultado del indicador desde el punto de monitoreo más alto hasta el más bajo de la corriente, identificando el comportamiento de las condiciones (estado) de calidad del agua a lo largo del río.

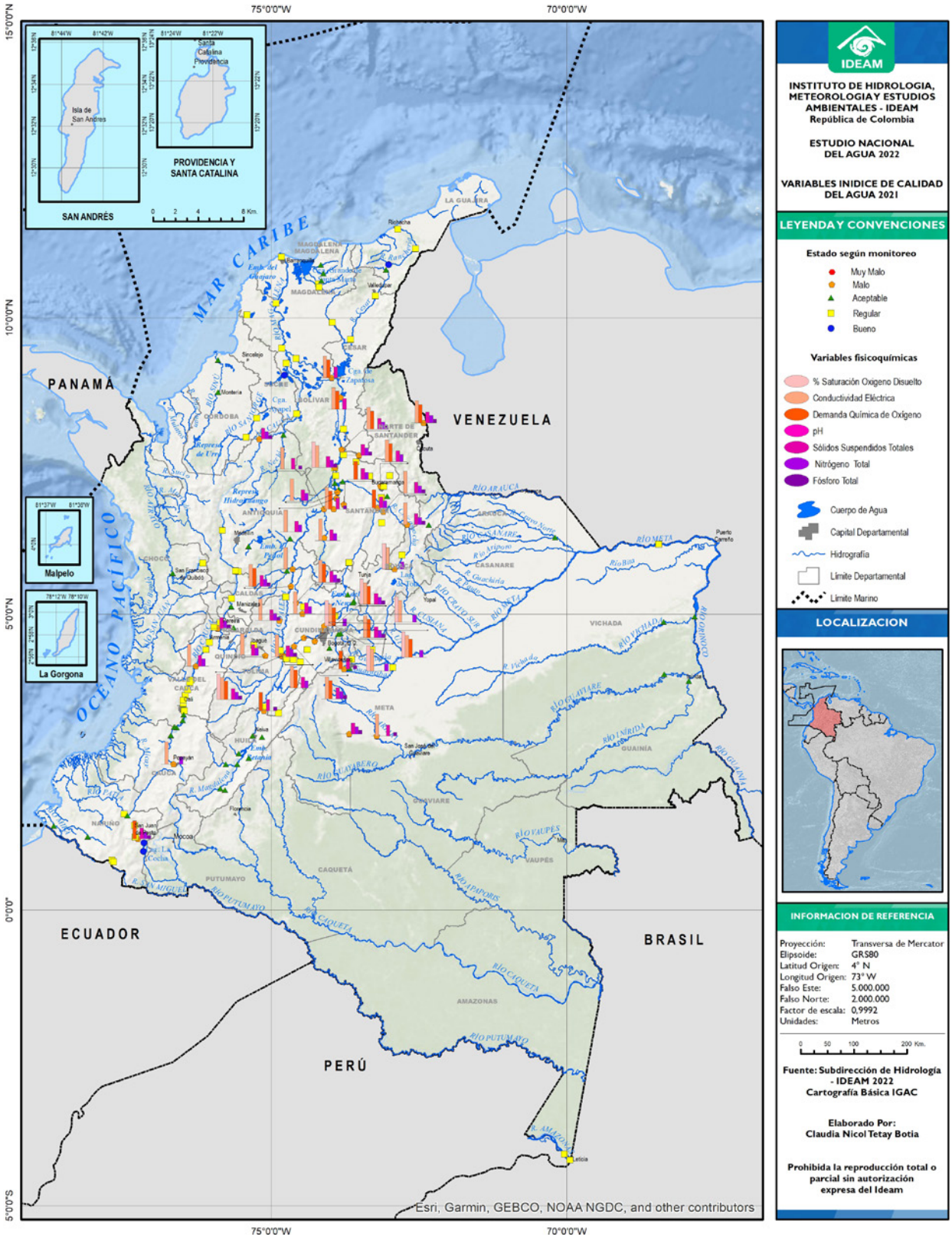



Figura 228. Índice de calidad del agua 2021.

Tabla 67. Puntos de monitoreo con categoría «malo» del ICA 2021.

| Punto de monitoreo | Corriente | Departamento | Municipio | ICA | Variables que más insiden en la categorización MALA |
|---|---|---|---|---|---|
| Cortijo El 37 | Bogotá | Cundinamarca | Bogotá | Malo | OD, CE, DQO, NT/PT |
| Frente Hacienda Darién | Bogotá | Cundinamarca | Chía | Malo | OD, CE, NT/PT |
| Pte.El Común | Bogotá | Cundinamarca | Chía | Malo | CE, DQO, NT/PT |
| Antes de la desembocadura en el río Magdalena. | Carare | Santander | Puerto Parra | Malo | DQO, SST, NT/PT |
| Café Madrid | Lebrija | Santander | Girón | Malo | CE, DQO, SST, NT/PT |
| Magdalena_San Pablo río Magdalena | Magdalena | Bolívar | San Pablo | Malo | OD, CE, SST, NT/PT |
| Magdalena_desembocadura río Opon | Magdalena | Santander | Barrancabermeja | Malo | CE, SST, NT/PT |
| Magdalena_Puerto Wilches_Sitio Nuevo R-11 | Magdalena | Santander | Puerto Wilches | Malo | CE, DQO, SST, NT/PT |
| Ariari_Pto.Rico | Ariari | Meta | Puerto Rico | Malo | DQO, SST, NT/PT |
| Bogotá_Pte.La Virgen | Bogotá | Cundinamarca | Cota | Malo | OD, CE, DQO, NT/PT |
| Bogotá_La_Campiña | Bogotá | Cundinamarca | Girardot | Malo | OD, CE, DQO, SST, NT/PT |
| Bogotá_Alicachín - El Salto | Bogotá | Cundinamarca | Sibaté | Malo | OD, CE, DQO, SST, NT/PT |
| Bogotá_Pte.Carretera La Mesa - Mesitas | Bogotá | Cundinamarca | Tena | Malo | CE, DQO, SST, NT/PT |
| Bogotá_Pte.Portillo | Bogotá | Cundinamarca | Tocaima | Malo | CE, DQO, SST, NT/PT |
| Cabrera_San Alfonso | Cabrera | Huila | Villavieja | Malo | DQO, SST, NT/PT |
| Carare_Sta.Rosa | Carare | Santander | Cimitarra | Malo | CE, SST, NT/PT |
| Cauca_La Coquera | Cauca | Antioquia | Caucasia | Malo | SST, NT/PT |
| Cauca_Julumito | Cauca | Cauca | Popayán | Malo | CE, pH, NT/PT |
| Chicamocha_Capitanejo | Chicamocha | Boyacá | Covarachía | Malo | DQO, SST, NT/PT |
| Chicamocha_Pte.Chameza | Chicamocha | Boyacá | Sogamoso | Malo | OD, CE, NT/PT |
| Chicamocha_Jordán El | Chicamocha | Santander | El Jordán | Malo | DQO, SST, NT/PT |
| Coello_Payande | Coello | Tolima | San Luis | Malo | DQO, SST, NT/PT |
| Guayuriba_Pte.Carretera | Guayuriba | Meta | Villavicencio | Malo | DQO, SST, NT/PT |
| Güejar_Pinalito | Güejar | Meta | Vista Hermosa | Malo | SST, NT/PT |
| La Colorada_Ayacucho | La Colorada | Santander | Simacota | Malo | DQO, SST, NT/PT |
| La Vieja_Cartago | La Vieja | Valle del Cauca | Cartago | Malo | DQO, SST, NT/PT |
| Lagunilla_ La Esmeralda | Lagunilla | Tolima | Lérida | Malo | CE, DQO, SST, NT/PT |
| Magdalena_Regidor | Magdalena | Bolívar | Regidor | Malo | CE, DQO, SST |
| Magdalena_Girardot | Magdalena | Cundinamarca | Girardot | Malo | CE, DQO, SST, NT/PT |
| Magdalena_Puerto Salgar | Magdalena | Cundinamarca | Puerto Salgar | Malo | CE, DQO, SST, NT/PT |
| Magdalena_El Banco | Magdalena | Magdalena | El Banco | Malo | CE, DQO, SST |
| Magdalena_Barrancabermeja | Magdalena | Santander | Barrancabermeja | Malo | DQO, SST, NT/PT |
| Magdalena_Isla del Amor | Magdalena | Tolima | Flandes | Malo | CE, SST, NT/PT |
| Negro_Guaduero | Negro | Cundinamarca | Caparrapí | Malo | CE, DQO, SST, NT/PT |
| Negro_Pto.Libre | Negro | Cundinamarca | Puerto Salgar | Malo | CE, DQO, SST |
| Opon_Pte.Ferrocarril | Opón | Santander | Simacota | Malo | CE, DQO, SST, NT/PT |
| Pamplonita_Aguas Claras | Pamplonita | Norte de Santander | Cúcuta | Malo | CE, DQO, SST, NT/PT |
| Pasto_Boca Toma Centenario | Pasto | Nariño | Pasto | Malo | DQO, SST, NT/PT |
| Sogamoso_El Juncal | Sogamoso | Santander | Los Santos | Malo | DQO, SST, NT/PT |
| Villeta_Villeta | Villeta | Cundinamarca | Villeta | Malo | CE, SST, NT/PT |
| Cauca_Riofrío | Cauca | Valle del Cauca | Ríofrío | Malo | CE, SST, NT/PT |
| San Alberto_El Hoyo | San Alberto | Cesar | San Alberto | Malo | pH, SST, NT/PT |

- ***Río Cauca***

En la corriente de río Cauca se consideran veinticinco puntos de monitoreo; el punto más alto se encuentra ubicado en el municipio de Popayán, a 1681 m s. n. m.; y el punto más bajo está en el municipio de San Jacinto del Cauca, a 40 m s. n. m. La Figura 229 muestra el comportamiento del indicador a lo largo del río monitoreado.

En el primer punto, el de mayor altura, las condiciones de calidad del agua son de categoría «malo», influenciadas principalmente por algún grado de acidez (en pH) y valores altos en conductividad (CE); se recupera la condición a categoría «aceptable» en el punto Suárez, ubicado a la altura del municipio de Suárez (Cauca). Esta condición se mantiene hasta el punto La Bolsa, donde cambia la categorización a «regular» y se mantiene hasta el municipio de Caucasia, en el punto La Coquera, donde nuevamente presenta una condición con categoría «malo», especialmente por altas concentración en sólidos (SST). A partir de este punto, se recuperan las condiciones y alcanza categoría de «regular» en el último punto monitoreado sobre el río Cauca Las Varas, a la altura del municipio de San Jacinto del Cauca. Durante el recorrido, los sólidos (SST) son una de las variables que inciden en la categorización de calidad de agua «regular» y «mala» del río.

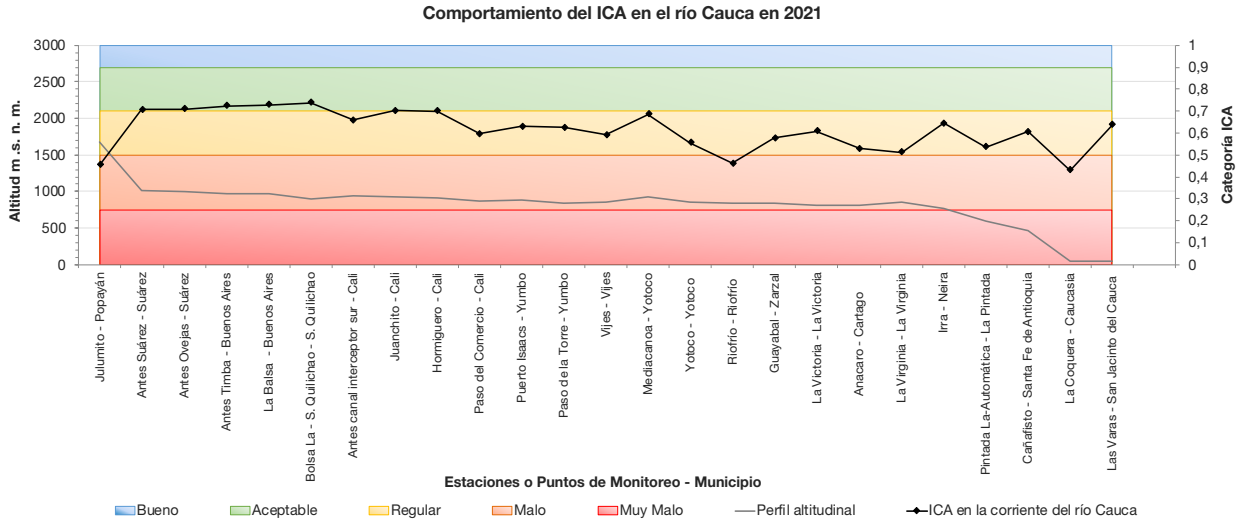



Figura 229. Índice de calidad del agua en el río Cauca 2021.

- ***Río Magdalena***

Sobre el río Magdalena se encuentran ubicados diecinueve puntos de monitoreo; el primer punto, Pericongo, está ubicado en el municipio de Altamira, a 839 m s. n. m. (departamento del Huila); y el último punto es el llamado Las Flores, a 8 m s. n. m., ubicado en la ciudad de Barranquilla, en el Atlántico (Figura 230).

Durante el recorrido del río se identifican diferentes condiciones de la calidad del agua; en la parte alta, las condiciones en los tres primeros puntos son de categoría «aceptable»; a medida que va avanzando, va desmejorando la condición a categoría «regular», pasando a categoría «malo» en los puntos ubicados a la altura de los municipios Girardot y Ricaurte, posiblemente por afluentes como el río Bogotá, que desemboca aguas arriba del punto Girardot. El indicador en la parte media del río se encuentra en categoría «malo», influenciado ante todo por altas concentraciones en sólidos (SST). A partir del punto de monitoreo Magangué, la condición cambia y vuelve a categoría «regular», en la que se mantiene hasta llegar a la desembocadura en el punto de monitoreo Las Flores, ubicado en Barranquilla.

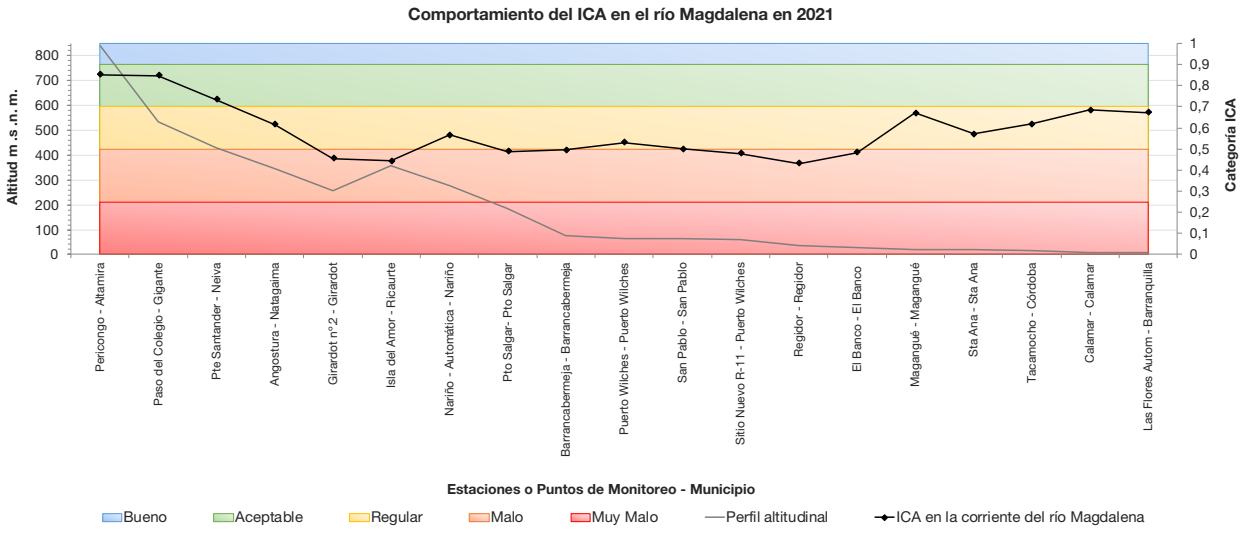



Figura 230. Índice de calidad del agua en el río Magdalena 2021.

- ***Río Bogotá***

Sobre la corriente del río Bogotá se encuentran ubicados ocho puntos de monitoreo que hacen parte de la Red de Referencia Nacional. El punto más alto está ubicado en el municipio de Villapinzón, a 2648 m s. n. m. En la Figura 231 se muestra el comportamiento del indicador a lo largo del tramo del río monitoreado.

El comportamiento del indicador a lo largo del río Bogotá se mantiene en la misma categorización durante los diferentes años (2013, 2016 y 2021), aunque como se observa en las gráficas de la Figura 231, el resultado cuantitativo varía, en especial en 2013, donde el indicador reflejó mejores condiciones a diferencia de 2016 y de 2021 en el punto Puente Carretera La Mesa-Mesitas. Esta diferencia se atribuye a la época de monitoreo y el caudal, lo cual indica que a mayor caudal, mayor capacidad de dilución del contaminante en el momento en que se toma la muestra para el análisis de las variables que hacen parte del indicador. En general, las condiciones de la calidad del agua en la parte alta son de categoría «aceptable» y, a medida que va avanzando la corriente, estas condiciones cambian a «regular» desde Tocancipá y se degradan en forma paulatina. Desde el punto Puente La Virgen, estación ubicada a la altura del municipio de Cota, las condiciones pasan a categoría «malo», y se mantienen hasta el punto de monitoreo La Campiña, ubicado en el municipio de Girardot, antes de la desembocadura del río Bogotá al río Magdalena. Los altos valores en conductividad (CE) y en materia orgánica (DQO), y las bajas concentraciones en oxígeno (OD) entre el punto Alicachín y La Campiña influyen en esta categorización del indicador de calidad de agua como «malo».

- ***Río Chicamocha***

Sobre el río Chicamocha se encuentran cinco puntos de monitoreo, el más alto en el municipio de Duitama (Boyacá) a 2500 m s. n. m. y el más bajo en el municipio de El Jordán (Santander) a 480 m s. n. m. El comportamiento del indicador sobre la corriente varía entre las categorías «regular» y «malo» (Figura 232).

El ICA del río Chicamocha sobre los puntos de monitoreo San Rafael y Puente Chámeza se mantuvieron en la misma categorización en tres años, a diferencia del punto Paz del Río, ubicado a la altura del municipio Paz del Río (Boyacá), que aunque cambió de categorización en el año 2013, el resultado cuantitativo se encuentra en el límite de «aceptable» a «regular». En el 2016, los puntos Capitanejo y El Jordán se mantienen en categoría «regular», mientras que en el 2021 estuvieron en

categoría «malo». A lo largo del río Chicamocha, los valores altos de conductividad (CE) y nutrientes, en especial nitrógeno total (NT), influyen en las categorizaciones «regular» y «malo»; y entre los puntos Capitanejo y El Jordán, el aporte en sólidos (SST) es mayor que en la parte alta del río.

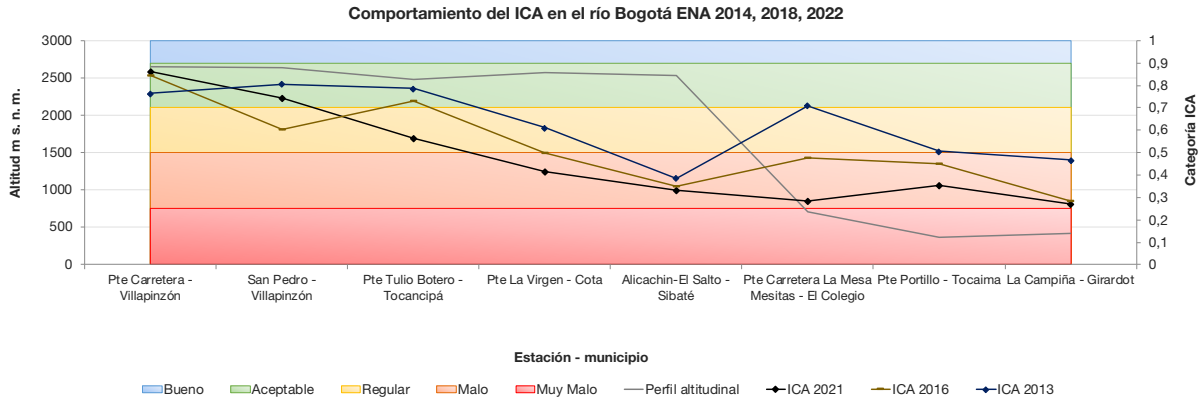



Figura 231. Índice de calidad del agua en el río Bogotá 2021.

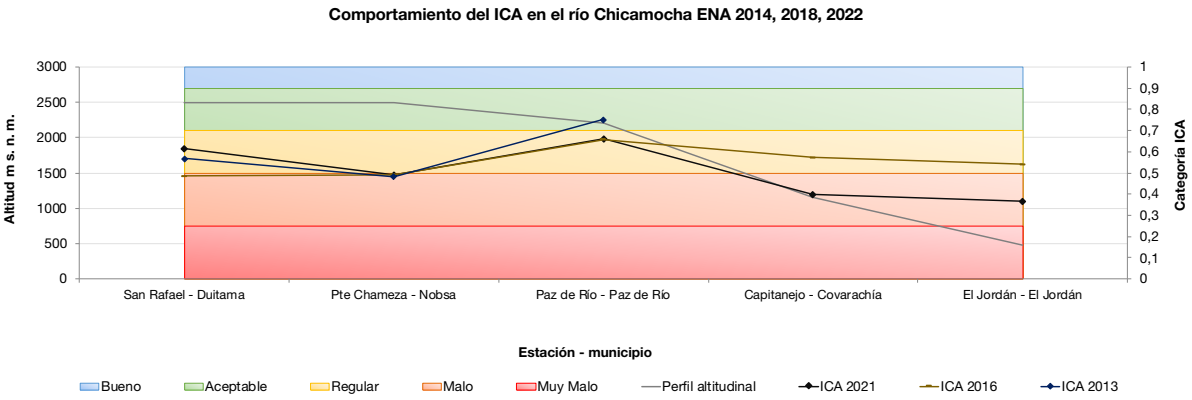



Figura 232. Índice de calidad del agua en el río Chicamocha 2021.

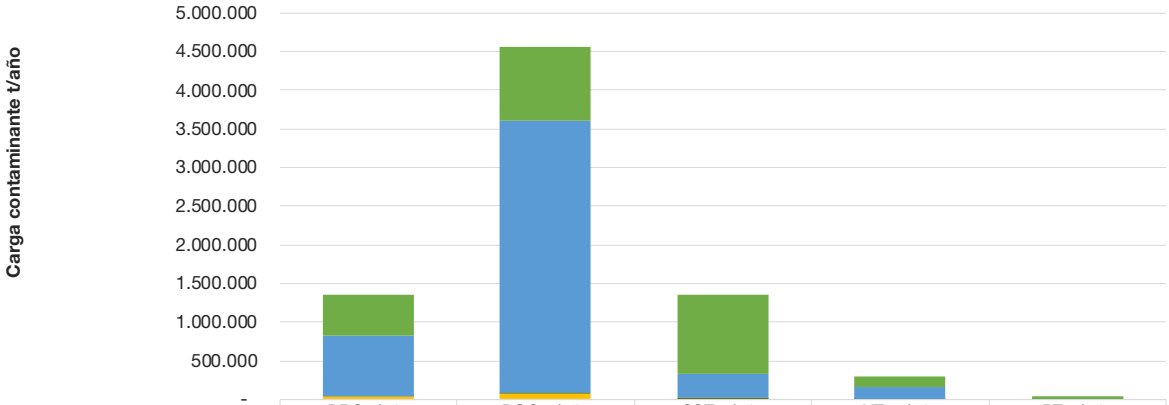
## 8.3 Presión sobre la calidad del agua

Para la evaluación de presión sobre la calidad del agua se actualizan los estimativos de cargas contaminantes puntuales generadas, removidas y las que finalmente son vertidas (carga neta) —por las actividades sociales y productivas— a los sistemas hídricos del país. Se hace el análisis de presiones por contaminación a partir de estas estimaciones y del índice de alteración potencial de calidad del agua (IACAL).

### 8.3.1 Carga contaminante puntual

De los sectores usuarios del recurso hídrico considerados para la evaluación de la calidad de agua (población, industria, sacrificio de ganado y beneficio de café) a nivel nacional, el sector industrial es el mayor aportante de carga orgánica neta que se vierte a las corrientes hídricas, que se estima en un 56 % del total de carga (1.349.595 t/año) de DBO que aportan estos cuatro sectores y de un 78 % del total de DQO (4.557.457). En el sector doméstico, el mayor aporte lo hacen los sólidos suspendidos totales con 75 % del total (1.350.208); y en nutrientes, en fósforo total (PT) el 92 % del total (42.703) y nitrógeno total (NT) el 46 % del total (300.743), tal como se aprecia en el diagrama de barras de la Figura 233.

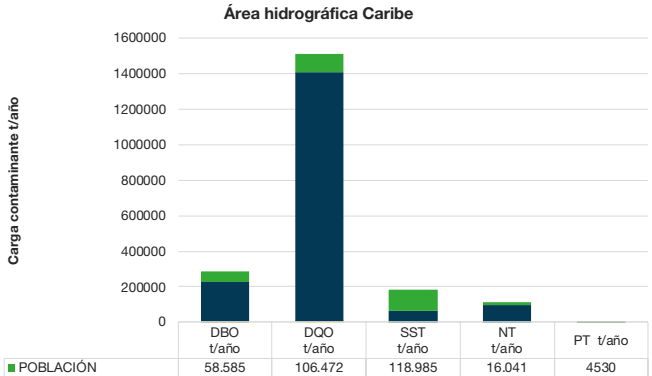
Las cargas contaminantes vertidas por los sectores industria, población, sacrificio de ganado y beneficio de café, discriminando los aportes por área hidrográfica, se ilustran con los diagramas de la Figura 234.



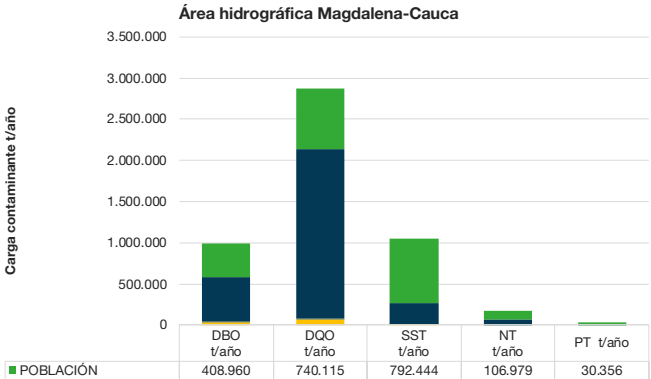

| | DBO t/año | DQO t/año | SST t/año | NT t/año | PT t/año |
|---|---|---|---|---|---|
| POBLACIÓN | 522.179 | 943.446 | 1.018.237 | 138.748 | 39.319 |
| INDUSTRIA | 778.756 | 3.519.372 | 314.671 | 160.629 | 3286 |
| SACRIFICIO DE GANADO | 11.403 | 17.815 | 8160 | 1365 | 98 |
| CAFÉ | 37.257 | 77.124 | 9139 | | |

Figura 233. Carga contaminante potencialmente vertida a las corrientes hídricas (t/año) 2020.

En el área hidrográfica Magdalena-Cauca, la carga contaminante de materia orgánica representada por las DQO y DBO vertidas la aporta la industria con 53 % y 72 %, respectivamente, del total en el área hidrográfica (991.679 t/año DBO y 2.876.624 t/año DQO). En relación con los sólidos suspendidos, la población vierte el 75 %; esta misma población, en relación con los nutrientes, vierte el 63 % de nitrógeno total (NT) y el 90 % de fósforo total (PT) del total en el área. En el área hidrográfica Caribe, el mayor aportante en materia orgánica es el sector industrial, representado por el 78 % en DBO y 93 % en DQO con respecto al total vertido en t/año en el área (287.126 t/año y 1.514.223 t/año, respectivamente). En cuanto a los SST, el mayor aportante es el sector población con un 66 % en relación con el total en el área (181.506 t/año). En Orinoco, Amazonas y Pacífico, el mayor aportante de materia orgánica, sólidos y nutrientes es el sector población, como se observa en la Figura 234. Los resultados muestran al área Magdalena-Cauca como la mayor aportante de vertimientos de acuerdo con el total nacional porque tiene la mayor concentración de industria y de población en Colombia.




| | DBO t/año | DQO t/año | SST t/año | NT t/año | PT t/año |
|---|---|---|---|---|---|
| POBLACIÓN | 58.585 | 106.472 | 118.985 | 16.041 | 4530 |
| INDUSTRIA | 225.606 | 1.402.499 | 61.130 | 97.415 | 47 |
| SACRIFICIO DE GANADO | 1454 | 2184 | 994 | 163 | 12 |
| CAFÉ | 1481 | 3066 | 397 | | |




| | DBO t/año | DQO t/año | SST t/año | NT t/año | PT t/año |
|---|---|---|---|---|---|
| POBLACIÓN | 408.960 | 740.115 | 792.444 | 106.979 | 30.356 |
| INDUSTRIA | 543.062 | 2.058.477 | 247.892 | 61.714 | 3185 |
| SACRIFICIO DE GANADO | 8457 | 13.445 | 6176 | 1042 | 74 |
| CAFÉ | 31.200 | 64.587 | 7905 | | |




Figura 234. Carga contaminante estimada por área hidrográfica 2020.

### 8.3.1.1 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

La carga orgánica biodegradable neta vertida a las corrientes hídricas superficiales en Colombia en el año 2020 fue de 1.349.595 t/año DBO, equivalente a 3698 t/día. Del total nacional de carga de materia orgánica biodegradable neta vertida, la industria aportó el 58 % (778.756 t/año); el sector población el 39 % (522.179 t/año); el sector cafetero aportó el 3 % (37.257) y el sacrificio de ganado el 1 % (11.403).

El mapa de la Figura 235 muestra las subzonas hidrográficas y el grado de aporte de carga contaminante en términos de DBO.

El 73 % de la carga de DBO con respecto al total nacional se concentra en dieciséis subzonas hidrográficas; estas subzonas son: Arroyos directos al Caribe; Río Bogotá; Río Totaré; Río Lebrija y otros directos al Magdalena; Río Guachal (Bolo-Fraile y Párraga); ríos Amaime y Cerrito; Río La Vieja; Río Otún y otros directos al Cauca; Ríos Lilí, Meléndez y Cañaveralejo; Río Porce; Río Pamplonita; Río Palo; Río Chinchiná; Río Quinamayo y otros directos al Cauca; Ríos Arroyohondo-Yumbo-Mulaló-Vijes–Yotoco; y Directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura.

Las cargas vertidas de las subzonas registradas en la Tabla 68 provienen de ciudades principales como Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla, Cartagena, Bucaramanga, Pereira e Ibagué y sus comunidades aledañas, donde se concentra el mayor porcentaje de población y de industria.

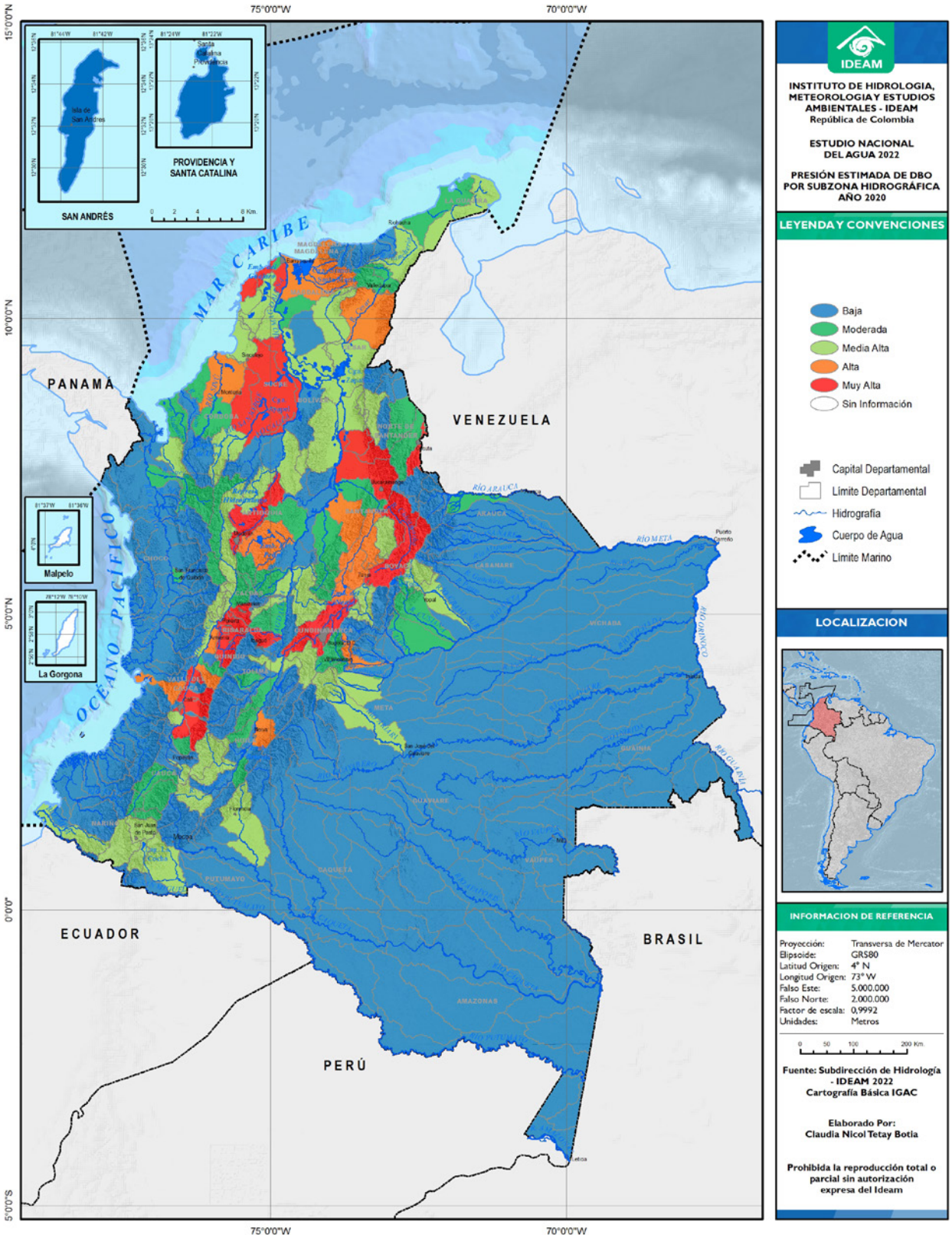



Figura 235. Presión estimada de DBO por subzona hidrográfica 2020.

Tabla 68. Subzonas hidrográficas con mayores aportes de carga de DBO, 2020.

| Subzonas hidrográficas | Aporte Población DBO t/año | Aporte Industria DBO t/año |
|---|---|---|
| Arroyos directos al Caribe | 4722 | 222.616 |
| Río Bogotá | 147.044 | 109.735 |
| Río Totare | 6524 | 67.664 |
| Río Lebrija y otros directos al Magdalena | 16.917 | 17.326 |
| Río Guachal (Bolo - Fraile y Párraga) | 6975 | 93.095 |
| Ríos Amaime y Cerrito | 1104 | 28.769 |
| Río La Vieja | 15.963 | 16.998 |
| Río Otún y otros directos al Cauca | 4954 | 17.940 |
| Ríos Lilí, Melendez y Canaveralejo | 27.062 | 21.462 |
| Río Porce | 15.134 | 52.199 |
| Directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura | 17.101 | 14.714 |

En la anterior tabla (Tabla 68), se observa la cantidad de carga contaminante que reciben las corrientes hídricas de once subzonas hidrográficas, representando el 50 % de la DBO en doméstico y 85 % de la DBO en industria, con respecto a la sumatoria nacional, que corresponde a 522.179 t/año en doméstico y 778.756 t/año en industria.

### 8.3.1.2 Demanda química de oxígeno (DQO)

Según estimaciones para 2020, el total de carga neta de demanda química de oxígeno vertida a los sistemas hídricos es de 4.557.757 t/año, correspondiente a 12.487 t/día. Del total de DQO neta vertida, la industria aportó el 77 % (3.519.372 t/año), el sector población el 21 % (943.446 t/año), el beneficio de café el 2 % (77.124 t/año) y el sacrificio de ganado el 0,4 % (17.815).

En el mapa de la Figura 236, se observan las subzonas hidrográficas y el grado de aporte de carga contaminante en términos de DQO.

El 84 % de la carga de DQO con respecto al total nacional se concentra en quince subzonas hidrográficas: Arroyos directos al Caribe; Río Bogotá; Río Totaré; Río Lebrija y otros directos al Magdalena; Río Guachal (Bolo-Fraile y Párraga); Ríos Amaime y Cerrito; Río La Vieja; Río Otún y otros directos al Cauca; Ríos Lilí, Meléndez y Cañaveralejo; Río Porce; Río Opón; Río Palo; Río Quinamayo y otros directos al Cauca; Ríos Arroyohondo-Yumbo-Mulaló-Vijes–Yotoco; y Directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura.

En la Tabla 69 se observa la carga contaminante que se vierte en once subzonas hidrográficas donde se encuentran ubicadas ciudades capitales como Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla, Cartagena, Bucaramanga, Pereira, Ibagué y sus comunidades aledañas, donde se concentra el mayor porcentaje de población e industria.

El vertimiento del sector doméstico de estas SZH asociadas con las principales ciudades alcanza el 57 % del total doméstico (943.446 t/año) y 29 % del total industrial (3.519.372 t/año) de carga de materia orgánica representada por la DQO con respecto al total vertido por cada sector.

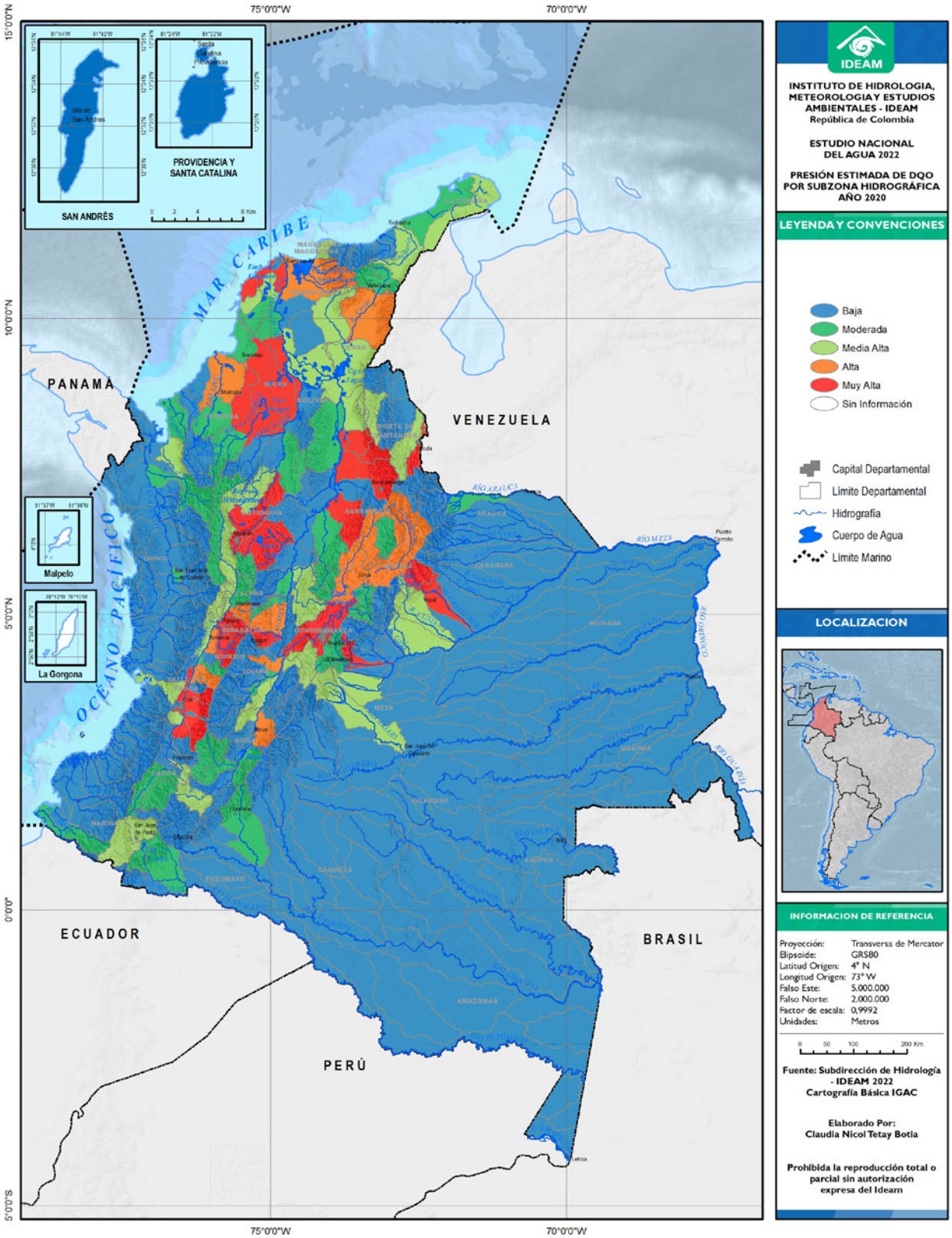



Figura 236. Presión estimada de DQO por subzona hidrográfica 2020.

Tabla 69. Subzonas hidrográficas con mayores aportes de carga de DQO, 2020.

| Subzonas hidrográficas | Aporte Población DQO t/año | Aporte Industria DQO t/año |
|---|---|---|
| Bajo Sinú | 14.679 | 1593 |
| Río Pamplonita | 28.150 | 7832 |
| Río Bogotá | 261.411 | 438.130 |
| Río Lebrija y otros directos al Magdalena | 30.689 | 30.466 |
| Río Chicamocha | 16.242 | 6669 |
| Bajo San Jorge - La Mojana | 26.101 | 858 |
| Río La Vieja | 28.660 | 28.561 |
| Río Chinchiná | 19.310 | 6866 |
| Ríos Lilí, Melendez y Canaveralejo | 47.986 | 242.015 |
| Río Porce | 31.226 | 227.721 |
| Directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura | 32.559 | 36.766 |

### 8.3.1.3 Sólidos suspendidos totales (SST)

La carga de sólidos neta vertida a las corrientes hídricas superficiales por los cuatro sectores en el año 2020 fue de 1.350.208 t/año, correspondiente a 3699 t/día. Del total de carga de SST vertida, la industria aportó el 23 % (314.671 t/año), el sector doméstico el 75 % (1.018.237 t/año), el sector cafetero el 1 % (9139 t/año) y el sacrificio de ganado el 1 % (8160 t/año).

La diferencia de aportes de carga de SST por subzona hidrográfica, año 2020, se muestra en el mapa de la Figura 237; esta presión por contaminación de sólidos suspendidos va desde 4 t/año en la subzona hidrográfica Caño Nabuquén, en el departamento del Amazonas, donde se registran solo vertimientos por población, hasta 276.473 t/año en la subzona del río Bogotá, donde los cuatro sectores analizados realizan vertimiento a los sistemas hídricos de los municipios que hacen parte de la SZH, en el departamento de Cundinamarca.

El 68 % de la carga de SST con respecto al total nacional se concentra en diecisiete subzonas hidrográficas. Estas subzonas son: Arroyos directos al Caribe; Río Bogotá; Río Totare; Río Lebrija y otros directos al Magdalena; Río Guachal (Bolo-Fraile y Párraga); Río La Vieja; Río Otún y otros directos al Cauca; Ríos Lilí, Meléndez y Cañaveralejo; Río Porce; Bajo Sinú; Río Chicamocha; Bajo San Jorge–La Mojana; Ríos Guadalajara y San Pedro; Río Pamplonita; Río Chinchiná; Río Guatiquía; y Directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura.

En la Tabla 70 se puede observar la cantidad de aportes que hacen once subzonas hidrográficas.

En estas once subzonas se encuentra ubicadas ciudades principales como Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla, Cartagena, Bucaramanga y Cúcuta, que aportan el 56 % del total doméstico (1.018.237 t/año) y el 57 % del total de industria (314.671 t/año) con respecto al total vertido por los cuatro sectores evaluados.

### 8.3.1.4 Nitrógeno total (NT)

La carga de nitrógeno total neta vertida a las corrientes hídricas superficiales por los cuatro sectores en el año 2020 es de 300.743 t/año. Del total de carga de NT vertida, la industria aportó el 53,4 %, la población el 46,1 % y el sacrificio de ganado el 0,5 %.

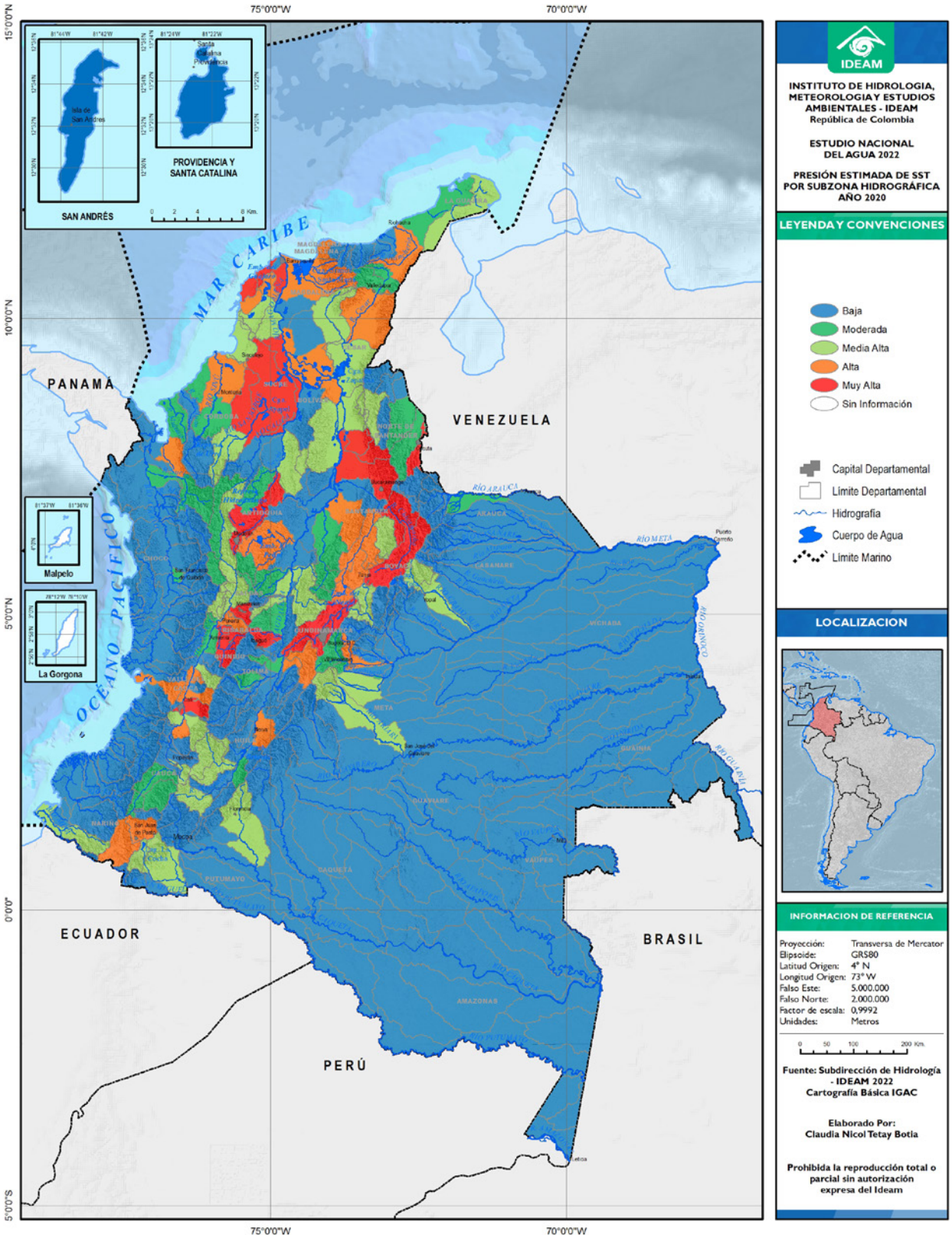



Figura 237. Presión estimada de SST por subzona hidrográfica 2020.

Tabla 70. Subzonas hidrográficas con mayores aportes de carga de SST, 2020.

| Subzonas hidrográficas | Aporte Población SST t/año | Aporte Industria SST t/año |
|---|---|---|
| Bajo Sinú | 15.447 | 422 |
| Río Pamplonita | 33.282 | 117 |
| Río Bogotá | 276.474 | 65.598 |
| Río Lebrija y otros directos al Magdalena | 35.512 | 11.477 |
| Río Chicamocha | 18.653 | 526 |
| Bajo San Jorge - La Mojana | 29.718 | 100 |
| Río La Vieja | 33.879 | 20.147 |
| Río Chinchiná | 22.882 | 397 |
| Ríos Lilí, Melendez y Canaveralejo | 38.909 | 30.456 |
| Río Porce | 28.299 | 43.193 |
| Directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura | 33.832 | 7843 |

El 72 % de la carga de NT se concentró en once subzonas hidrográficas con respecto al total nacional, las cuales son: Río Bogotá; Río Porce; Arroyos directos al Caribe; Ríos Lilí, Meléndez y Cañaveralejo; Directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura; Río Pamplonita; Río La Vieja; Río Lebrija y otros directos al Magdalena; Río Totaré; Río Suárez; Río Otún y otros directos al Cauca, en los departamentos de Antioquia, Atlántico, Cundinamarca, Bogotá D. C., Bolívar, Valle del Cauca, Cesar, Norte de Santander, Quindío, Risaralda, Santander y Tolima.

#### 8.3.1.5 Fósforo total (PT)

La carga de PT vertida a las corrientes hídricas superficiales por los tres sectores en el año 2020 fue de 42.703 t/año. Del total de carga de PT vertida, la industria aporto el 7,8 %, el sector población el 92 % y el sacrificio de ganado el 0,2 %.

El 57 % de la carga total de PT se concentró en once subzonas hidrográficas: Bajo Sinú; Río Pamplonita; Río Bogotá; Río Lebrija y otros directos al Magdalena; Río Chicamocha; Bajo San Jorge - La Mojana; Río La Vieja; Río Chinchiná; Ríos Lilí, Meléndez y Cañaveralejo; Río Porce; y Directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura, en los departamentos de Antioquia, Atlántico, Cundinamarca, Bogotá D. C., Bolívar, Valle del Cauca, Cesar, Córdoba, Norte de Santander, Quindío, Risaralda, Santander y Sucre.

### 8.3.2 Cargas contaminantes generadas por los sectores usuarios del agua y removidas por sistemas de tratamiento de aguas residuales

De acuerdo con la consulta y el análisis hechos para los sectores industria y población, y teniendo en cuenta las limitaciones en la información y en la metodología presentada en el numeral 8.1.2, se relacionan a continuación los estimativos de carga contaminante generada por estos sectores, removida por los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales y vertida en las corrientes hídricas (Tabla 71).

Para el año 2020, se contó con información de 354 municipios con plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y se identificaron dieciséis municipios adicionales con respecto al ENA 2018 que cuentan con reportes de sistemas de tratamiento de aguas residuales, los cuales se relacionan en la Tabla 72.

Tabla 71. Carga contaminante generada por los sectores usuarios y removida en sistemas de tratamiento de aguas residuales, 2020.

| Parámetro | Carga generada por población e industria (t/año) | Carga vertida por población e industria (t/año) | Cantidad removida (t/año) | % de remoción |
|---|---|---|---|---|
| DBO | 2.492.628 | 1.300.935 | 1.191.693 | 48 % |
| DQO | 8.677.576 | 4.462.818 | 4.214.758 | 49 % |
| SST | 2.776.681 | 1.332.908 | 1.443.773 | 52 % |
| NT | 330.297 | 299.377 | 30.920 | 9 % |
| PT | 50.203 | 42.605 | 7598 | 15 % |

Tabla 72. Municipios con nuevos reportes de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas en 2020 con respecto al ENA 2018

| Departamento | Código Divipola | Municipio |
|---|---|---|
| Magdalena | 47053 | Aracataca |
| Cundinamarca | 25126 | Cajicá |
| Valle del Cauca | 76130 | Candelaria |
| Magdalena | 47189 | Ciénaga |
| Cundinamarca | 25214 | Cota |
| Cundinamarca | 25279 | Fómeque |
| Magdalena | 47288 | Fundación |
| Antioquia | 5318 | Guarne |
| Cundinamarca | 25430 | Madrid |
| Antioquia | 5440 | Marinilla |
| Santander | 68547 | Piedecuesta |
| Antioquia | 5579 | Puerto Berrío |
| Sucre | 70742 | San Luis de Since |
| Antioquia | 5665 | San Pedro de Urabá |
| Sucre | 70001 | Sincelejo |
| Cundinamarca | 25817 | Tocancipá |

La carga de materia orgánica (DBO) tratada del sector doméstico en el 2020 fue de 390.071 t/año que equivale al 43 % del total generado por este sector (912.250 t/año). En DQO fue de 691.582 t/año, que corresponde al 42 % del total generado (1.635.028 t/año); y en SST se estimaron 957.464 t/año, correspondientes al 48 % del total generado (1.975.702 t/año).

En la Tabla 73, se muestran los porcentajes de remoción por parámetro en los sectores industrial y doméstico a nivel nacional.

Tabla 73. Porcentajes de remoción de carga contaminante a nivel nacional, sectores industrial y doméstico, en 2020 con respecto al ENA 2018.

| Parámetro | Remoción industria (%) | Remoción doméstico (%) |
|---|---|---|
| DBO | 51 % | 43 % |
| DQO | 50 % | 42 % |
| SST | 61 % | 48 % |
| NT | 2 % | 17 % |
| PT | 1 % | 16 % |

De acuerdo con la información reportada por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, en 2020 el caudal tratado por las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas fue de 33,7 $m^3/s$, y el porcentaje de aguas residuales tratadas en términos de caudal fue de 52,02 %.

## 8.3.3 Uso de mercurio

### Revisión de información relacionada con el uso de mercurio en la actividad minera

En la identificación de diferentes fuentes de información que generan datos o estudios acerca del mercurio, las respectivas plataformas reportan datos no sistemáticos de mediciones de mercurio en agua, suelos y relaves. También se tiene información sobre la cantidad de mercurio incautado en actividades mineras por las Fuerzas Militares de Colombia.

A continuación, se describe, de forma general, la información que reportan dichas plataformas, indicando las dificultades para hacer análisis integral sobre los resultados generados y la importancia de que estos sistemas de monitoreo continúen en el tiempo para consolidar datos sistemáticos que permitan determinar la situación del país en cuanto al mercurio empleado para la minería aurífera.

### Plataforma Toxic Sites Identification Program (TSIP)

La TSIP es una plataforma global que reporta mediciones de sustancias como el mercurio a nivel mundial (Pure Earth Black Smith Institute, s. f.)[4]; para el caso de Colombia, se dispone de mediciones de mercurio elemental. En la siguiente figura (Figura 238), se observa la distribución de los puntos de medición y algunas de las características asociadas a cada punto de monitoreo.




Figura 238. Plataforma Toxic Sites Identification Program (TSIP).

## Planet Gold Colombia

Esta plataforma[5] de alcance nacional, y que complementa el portal TSIP, reporta mediciones de mercurio en agua, suelo y relaves. La distribución espacial de los monitoreos es similar a la de la plataforma TSIP; sin embargo, la ventaja del Planet Gold Colombia (Figura 239) es que presenta información desagregada de acuerdo con el medio de monitoreo (agua, suelo o relave) y reporta las concentraciones de mercurio medidas en campo y en laboratorio.

Adicionalmente, la plataforma reporta algunos indicadores que complementan los análisis (Figura 240). Por ejemplo, evidencia que para el año 2020 se tomaron 517 muestras de mercurio y también hace una relación de consumo de mercurio por unidad de oro producida, entre otros indicadores.




Figura 239. Planet Gold Colombia.

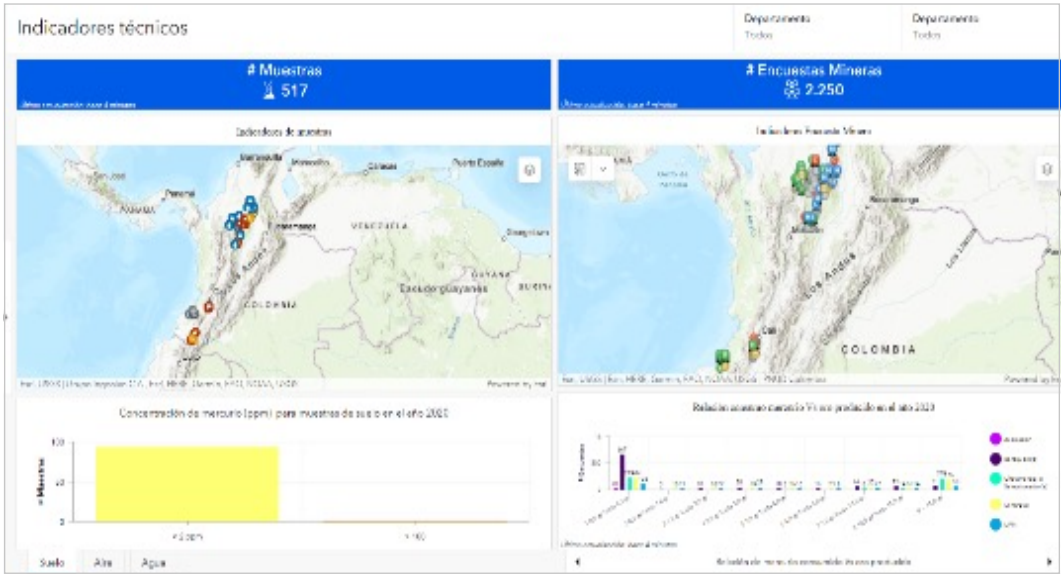



Figura 240. Reporte de algunos indicadores Planet Gold Colombia.

[4] Link de acceso a la plataforma https://www.contaminatedsites.org/
[5] Enlace de acceso a la plataforma https://gmarquin.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=ff2fc8a1093a4240a2741fbdc01175c9

## Plataforma Piragua

Plataforma administrada por la autoridad ambiental Corantioquia, entidad con jurisdicción en ochenta municipios del departamento de Antioquia. En la plataforma Piragua[6] (Figura 241), se reportan mediciones de mercurio en fuentes hídricas superficiales. Sin embargo, dadas las características del mercurio, es difícil detectarlo en muestreos de agua, ya que este tipo de sustancias precipitan fácilmente, por lo que deben ser monitoreadas en los sedimentos.



Figura 241. Plataforma Piragua.

## Sentencia sobre el río Atrato T-622 de 2016

Aunque no se trata como tal de una plataforma, a partir de la expedición de la sentencia T-622 de 2016, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible viene realizando mediciones de mercurio en suelos con el fin de analizar si estos pueden ser empleados en actividades agropecuarias como medida de restitución ambiental y económica de las poblaciones. Como se observa, estas mediciones se realizan en un medio y con un objetivo diferente a la información reportada en otras plataformas, lo que no permite hacer un análisis integrado entre ellas. El proceso de monitoreo realizado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en el marco de la sentencia tiene un periodo determinado; posteriormente, será ejecutado por las autoridades ambientales con jurisdicción del río Atrato que corresponden a Codechocó y Corpourabá. Este cambio de actores puede generar modificaciones en la frecuencia y en los sitios de medición.

## Reporte de incautación de mercurio

Considerando que el mercurio es una sustancia prohibida en la actividad minera, el Ejército de Colombia viene adelantando acciones en contra del uso de dicha sustancia. En tal sentido, se tiene el reporte de mercurio incautado para los años 2021 y 2022 (Figura 242 y Tabla 74), operativos que han sido realizados principalmente en el departamento de Antioquia.

[6] https://geopiragua.corantioquia.gov.co/

Tabla 74. Reporte de mercurio incautado años 2021 y 2022.

| Año | Mercurio incautado (kg) | Departamento | Mercurio incautado (kg) – 2021* |
|---|---|---|---|
| 2021 | 26,95 | Antioquia | 18,02 |
| 2022 | 18,30 | Bolívar | 0,28 |

Fuente: Ejército Nacional de Colombia / *Actualizado al mes de octubre de 2022.

### Reflexiones respecto al reporte de uso de mercurio en la actividad aurífera

A partir de las consultas con expertos que administran las plataformas y los sistemas de información, se identificaron varios aspectos que se deben considerar a futuro para generar un análisis integral del uso de mercurio en la actividad minera y su incidencia en la calidad del recurso hídrico. Estas se enuncian a continuación:

- Los sistemas de información actuales no garantizan un monitoreo continuo temporal y espacialmente; por lo tanto, no se podrían generar análisis comparativos en diferentes periodos de tiempo y en zonas que permitan evidenciar cambios asociados al uso de esta sustancia.

- Parte de las mediciones de mercurio se realizan directo sobre las fuentes hídricas; en estos casos, los resultados de mercurio están por debajo del límite de detección, ya que el mercurio sedimenta y no es detectado en las muestras de agua.

- Se presenta una distribución de mediciones más que todo en la zona Andina y en parte del Pacífico; sin embargo, en otras zonas donde hay presencia minera y uso de mercurio no se tienen mediciones por dificultades de acceso a dichas áreas; esto no permite generar un diagnóstico completo en todo el país, aspecto que es clave para el Estudio Nacional del Agua.

- Desde el ámbito nacional, se debe diseñar una plataforma para el reporte y la centralización de la información bajo unos criterios técnicos que permitan generar consolidados a nivel país. Para esto se requiere la construcción de un protocolo para la toma de muestras de mercurio en los diferentes medios que garanticen la relación entre el mercurio detectado y la actividad mineral.

- La falta de normatividad en Colombia no permite establecer si las concentraciones de mercurio detectadas en las muestras sobrepasan un determinado límite que genere afectaciones en los ecosistemas. En las condiciones actuales, las mediciones permiten reportar el uso de esta sustancia que está prohibida, pero no logran determinar su impacto en el recurso hídrico.

Sobre estos aspectos y otros se debe diseñar e implementar una agenda de trabajo institucional, que permita generar información técnica a futuro, de alta confiabilidad, con el fin de hacer análisis sobre el uso de mercurio en la actividad minera y el impacto sobre las fuentes hídricas, no solo para dar cumplimiento al Convenio de Minamata, sino para todo el accionar institucional del país en materia ambiental, que incluye al Estudio Nacional del Agua.

## 8.3.4 Uso de agroquímicos en la agricultura

La información de uso de agroquímicos para la agricultura en Colombia, por municipio, ha sido muy limitada para incluirla en los estudios nacionales del agua. En la Figura 243, se observa la demanda potencial nacional de acuerdo con los datos reportados en las estadísticas de comercialización de fertilizantes (ICA, 2021) y plaguicidas (ICA, 2021) del Instituto Colombiano Agropecuario.

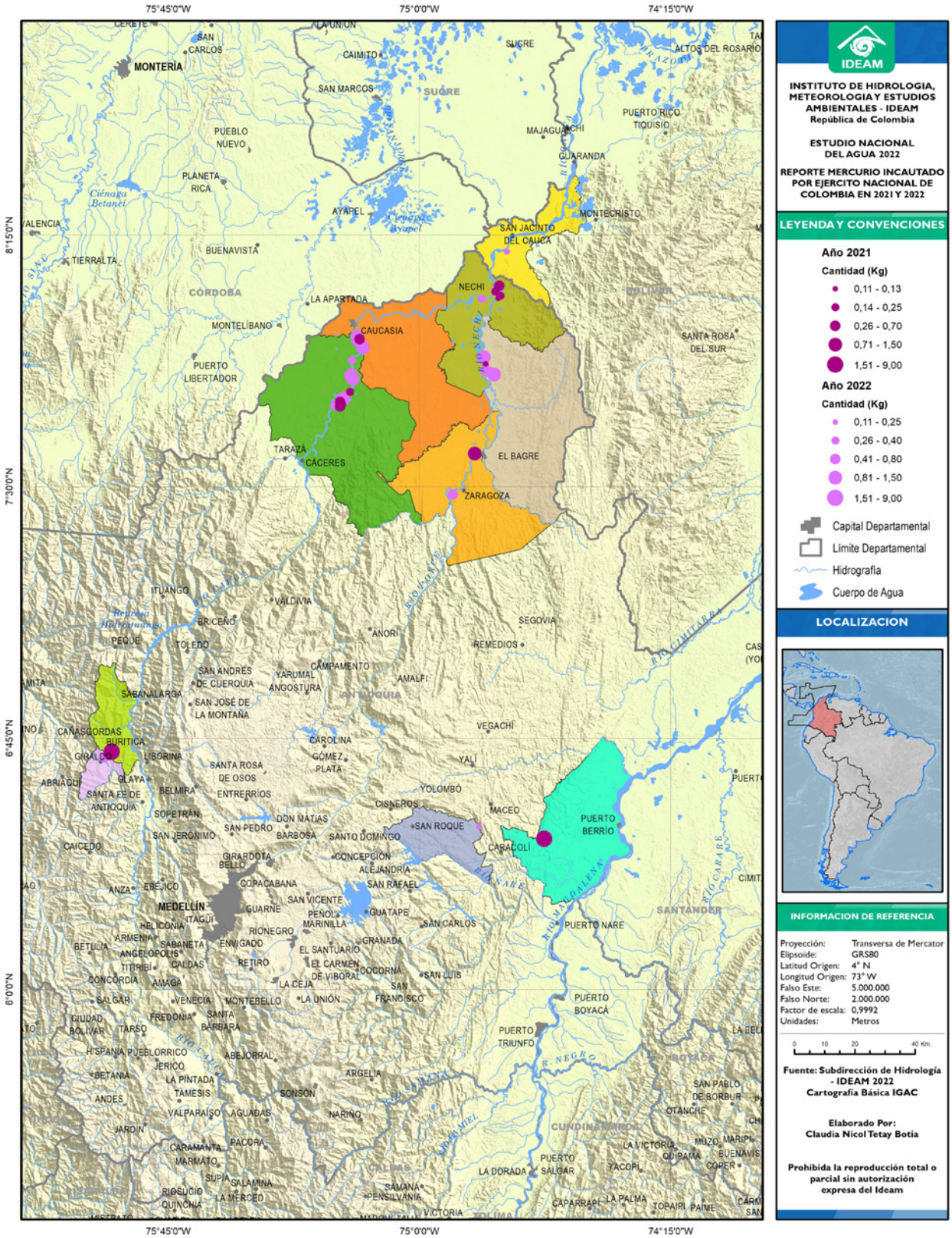



Figura 242. Reporte de mercurio incautado años 2021 y 2022.
Fuente: Ejército de Colombia.

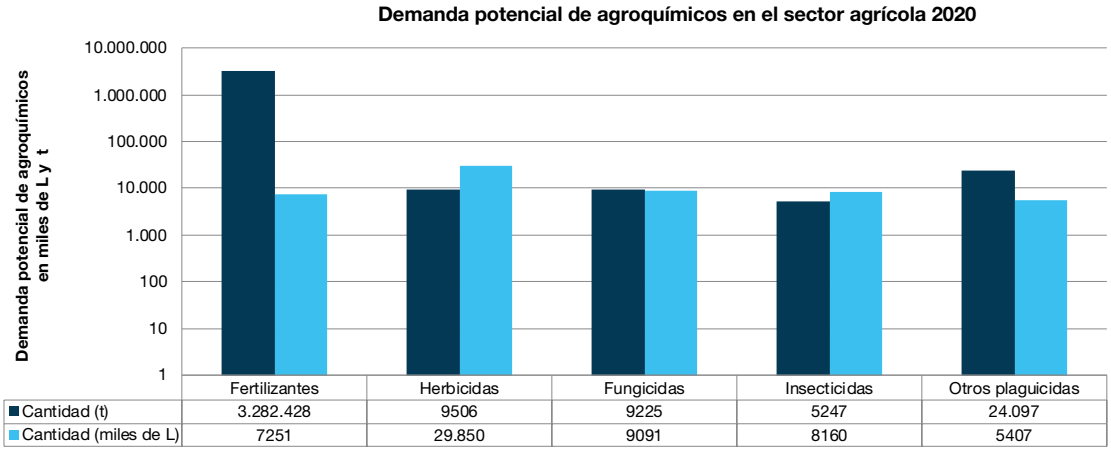



Figura 243. Demanda nacional potencial de agroquímicos en el sector agrícola.
Fuente (ICA, 2021).

En el 2020, la demanda potencial estimada en fertilizantes fue de 3.282.428 toneladas en presentación sólida y de 7.251.000 de litros en formulaciones líquidas. La fuente de información para estimar el potencial uso de agroquímicos es el Instituto Colombiano Agropecuario[7] (Instituto Colombiano Agropecuario ICA, 2021), que reporta la cantidad en toneladas y litros de los insumos químicos producidos, importados y exportados en Colombia. Metodológicamente, el cálculo realizado para el ENA corresponde al balance entre la cantidad de agroquímicos producidos, importados y exportados. En la Tabla 75 y en la Tabla 76, se presenta el consolidado del uso de agroquímicos para los años 2008, 2012, 2014, 2019 y 2020.

Tabla 75. Reporte de agroquímicos expresados en toneladas para los ENA 2010, 2014 y 2018, y para el año 2020.

| Agroquímico | Cantidad (t) 2008 | Cantidad (t) 2012 | Cantidad (t) 2016 | Cantidad (t) 2019 | Cantidad (t) 2020 |
|---|---|---|---|---|---|
| Fertilizantes | 2.594.191 | 2.516.084 | 3.300.455 | 3.135.620 | 3.282.428 |
| Herbicidas | 11.768 | 11.770 | 2553 | 12.427 | 9506 |
| Fungicidas | 11.602 | 10.745 | 12.993 | 57.274 | 9225 |
| Insecticidas | 3512 | 5056 | 4132 | 7967 | 5247 |
| Otros plaguicidas | 9169 | 3132 | 146 | 77.992 | 24.097 |
| **TOTAL** | 2.630.242 | 2.546.785 | 3.320.278 | 3.291.279 | 3.330.503 |

Fuente: elaboración propia a partir de Ideam (2010), Ideam (2015), Ideam (2019) y del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA, 2021).

[7] Información consultada el día 8 de agosto de 2022 en el enlace https://www.ica.gov.co/getdoc/bc02bf1f-68b4-4d82-b776-722e261b4ca8/estadisticas.aspx

Tabla 76. Reporte de agroquímicos expresados en litros para los ENA 2010, 2014, 2018, y para el año 2020.

| Agroquímico | Cantidad (miles de l) 2008 | Cantidad (miles de l) 2012 | Cantidad (miles de l) 2016 | Cantidad (miles de l) 2019 | Cantidad (miles de l) 2020 |
|---|---|---|---|---|---|
| Fertilizantes | 20.695 | 2914 | 60.590 | 62.428 | 7251 |
| Herbicidas | 16.238 | 25.225 | 25.789 | 7126 | 29.850 |
| Fungicidas | 732 | 10.369 | 9314 | 828 | 9091 |
| Insecticidas | 4664 | 5783 | 8011 | 2390 | 8160 |
| Otros plaguicidas | 8861 | 14.698 | 579 | 11.994 | 5407 |
| **TOTAL** | 51.191 | 58.989 | 104.284 | 84.766 | 59.759 |

Fuente: elaboración propia a partir de Ideam (2010), Ideam (2015), Ideam (2019) y del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA, 2021).

En la Figura 244 y en la Figura 245, se observa el comportamiento del uso de los agroquímicos. Los agroquímicos reportados en toneladas mantienen una tendencia estable en los años 2016, 2019 y 2020; los agroquímicos reportados en volumen (litros) presentan una tendencia decreciente en los años 2019 y 2020, con un pico máximo en el 2016.

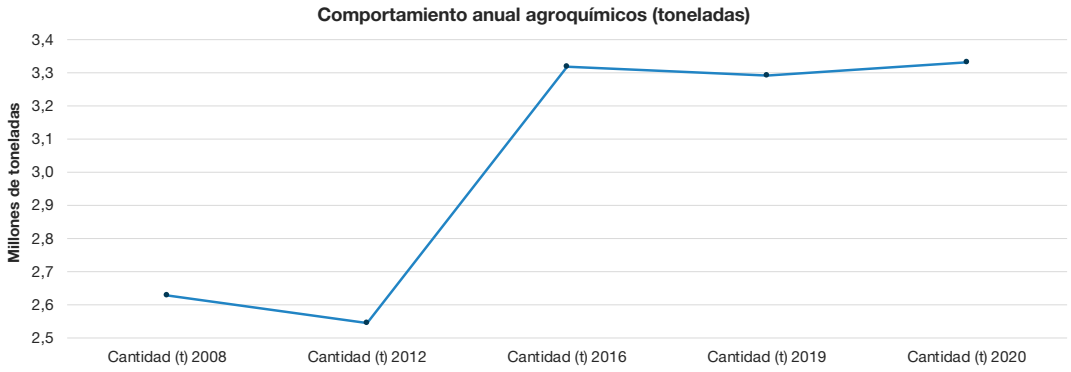



Figura 244. Comparativo de la cantidad de agroquímicos (toneladas) potencialmente usados en los años 2008, 2012, 2016, 2019 y 2020. Fuente: basado en Ideam (2010), Ideam (2015), Ideam (2019), ICA (2021).

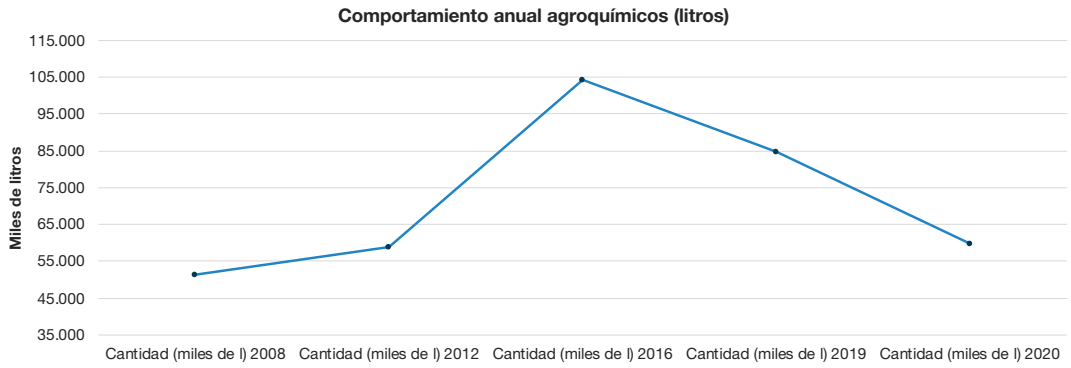



Figura 245. Comparativo de la cantidad de agroquímicos (litros) potencialmente usados en los años 2008, 2012, 2016, 2019 y 2020. Modificado a partir de Ideam (2010), Ideam (2015), Ideam (2019), ICA (2021).

La información sobre uso de agroquímicos agregada a escala de país no permite determinar su impacto en la calidad de las fuentes hídricas superficiales; por lo tanto, es necesario que dicha información se reporte a escala municipal, con el fin de hacer análisis a nivel de subzona hidrográfica para determinar la incidencia en términos de cuenca. Es importante también complementar la información asociando el cultivo para el cual se aplica determinado agroquímico, de tal forma que permita orientar mejor las políticas y acciones en materia ambiental.

### 8.3.5 Uso de sustancias químicas para la transformación de coca como uso ilícito

El uso de sustancias químicas para la transformación de la coca se soporta en las estadísticas que lleva la Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito en el grupo del Sistema Integrado de Monitoreo de Cultivos Ilícitos (SIMCI).

En 2020, para un total de 154.930 hectáreas (UNODC, 2021) se estimó el uso de 55.736 (litros/kilos) de productos de agroquímicos para el control de malezas, de 1.720.758 (litros/kilos) de productos fertilizantes y de 81.947 (litros/kilos) de productos fungicidas.

En la Figura 246 se muestran los departamentos con información de usos de sustancias químicas, se identifican los que cuentan con mayor demanda y los territorios que registran mayor producción potencial de base de cocaína.

El uso de sustancias químicas en los procesos de transformación a nivel nacional en 2020 fue de 326.146 toneladas, conformadas en un 0,1 % por oxidantes fuertes, 0,6 % por ácidos, 2,5 % de bases y 96,8 % de solventes orgánicos.

La Figura 247 muestra la comparación de los estimativos de sustancias químicas empleadas en la transformación de coca publicados en los ENA 2010, 2014 y 2018 con los de 2022.

En la Figura 247 se observa el aumento en el uso de sustancias químicas durante el 2020 (año base para el ENA 2022) con respecto al 2016 (año base para el ENA 2018). Durante los cuatro años de análisis del uso de sustancias químicas, solamente en el 2012 (año base para el ENA 2014) se registró una disminución en el uso.

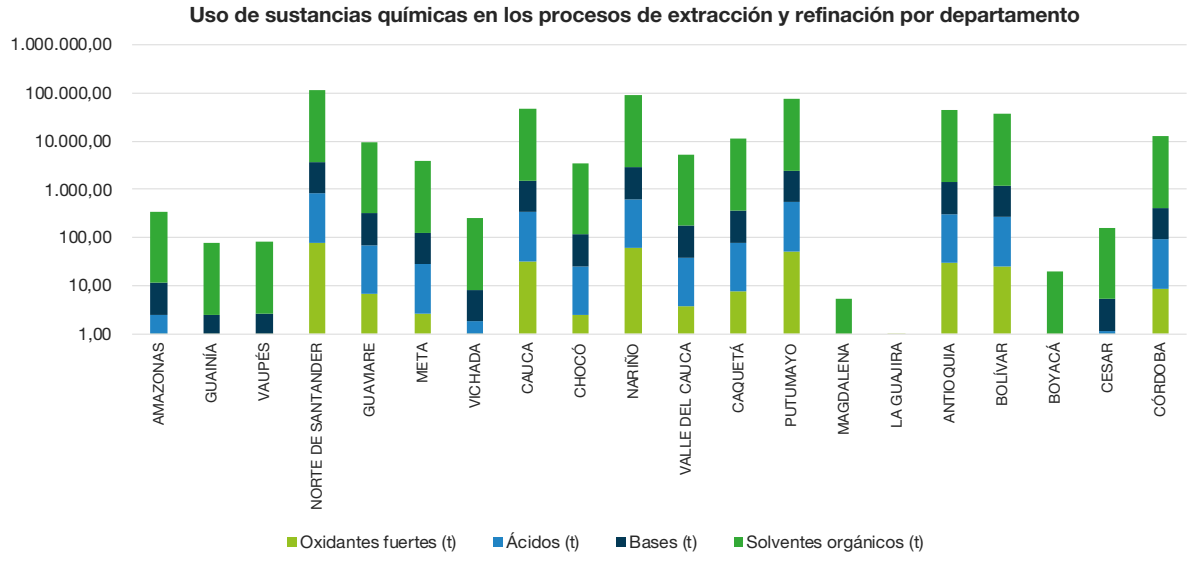



Figura 246. Uso de sustancias químicas en los procesos de transformación de coca como uso ilícito por departamento en 2020.
Fuente: (UNODC, 2021).

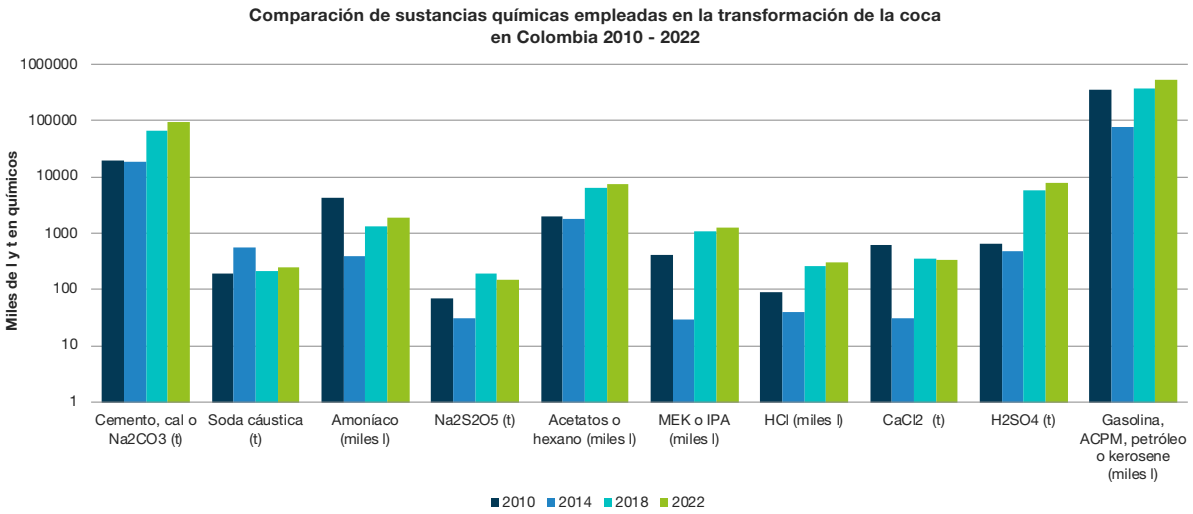



Figura 247. Comparación de sustancias químicas empleadas en la transformación de la coca en Colombia.

## 8.3.6 Índice de alteración potencial de la calidad del agua (IACAL)

Para el ENA 2022, al igual que en los dos estudios anteriores, se calculó el indicador para condiciones hidrológicas medias y secas. En la Figura 248 se presentan los mapas con los resultados del indicador y su categoría por subzona hidrográfica (SZH).

En el 2022, se encontraron 74 subzonas hidrográficas en categoría «alta» y «muy alta» en condiciones de año medio, a diferencia del 2018, donde se registraron 65 SZH en la misma categorización. En condiciones extremas de año seco se incrementa a 100 subzonas en las mismas categorías, aumentando tres subzonas con respecto al ENA 2018, ya que para dicho año se registraron 97 SZH en las mismas categorías. Las SZH que aumentaron en año seco de categoría «media alta» a «alta» en 2022 con respecto a 2018 fueron Medio Sinú, Río Palacé y Río Arma.

### IACAL en condiciones hidrológicas de año medio

A continuación, se relacionan por área hidrográfica las SZH con presiones por contaminación «muy alta» o «alta», teniendo como base los resultados del indicador para condiciones hidrológicas medias, así como los cambios de categoría con respecto a lo publicado en el ENA 2018.

En el área hidrográfica del Caribe, las subzonas identificadas en categoría «muy alta» son: Arroyos directos al Caribe, Bajo Sinú, Río Piedras-Río Manzanares, Río Ranchería, Directos Caribe Ay. Sharimahana Alta Guajira, Río Carraipía Paraguachón, Directos al golfo Maracaibo, Río Pamplonita, San Andrés. En categoría «alta» se encuentran las SZH: Río San Juan, Rio Canalete y otros arroyos directos al Caribe, Directos Caribe golfo de Morrosquillo, Río Zulia, Río Algodonal (Alto Catatumbo) y Providencia.

En el área hidrográfica Magdalena-Cauca, en condiciones de año medio, las subzonas en categoría «muy alta» son diecinueve: Río Fortalecillas y otros, Río Bogotá, Río Totare, Río Palo, Río Guachal (Bolo Fraile y Párraga), Ríos Amaime y Cerrito, Ríos Tuluá y Morales, Río La Vieja, Río Otún y otros directos al Cauca, Río Chinchiná, Río Quinamayo y otros directos al Cauca, Ríos Lilí, Meléndez y Cañaveralejo, Ríos Arroyohondo - Yumbo - Mulaló - Vijes – Yotoco, Ríos Guadalajara y San Pedro, Quebradas Las Cañas - Los Micos y Obando, Río Porce, Canal del Dique margen derecho, Directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura, Ciénaga Mallorquín.

En el área hidrográfica del Orinoco, la mayor categoría que se registró fue «alta», y las SZH que hacen parte de esta categoría son: Río Guatiquía y Río Garagoa, coincidiendo con respecto a los resultados de 2018;

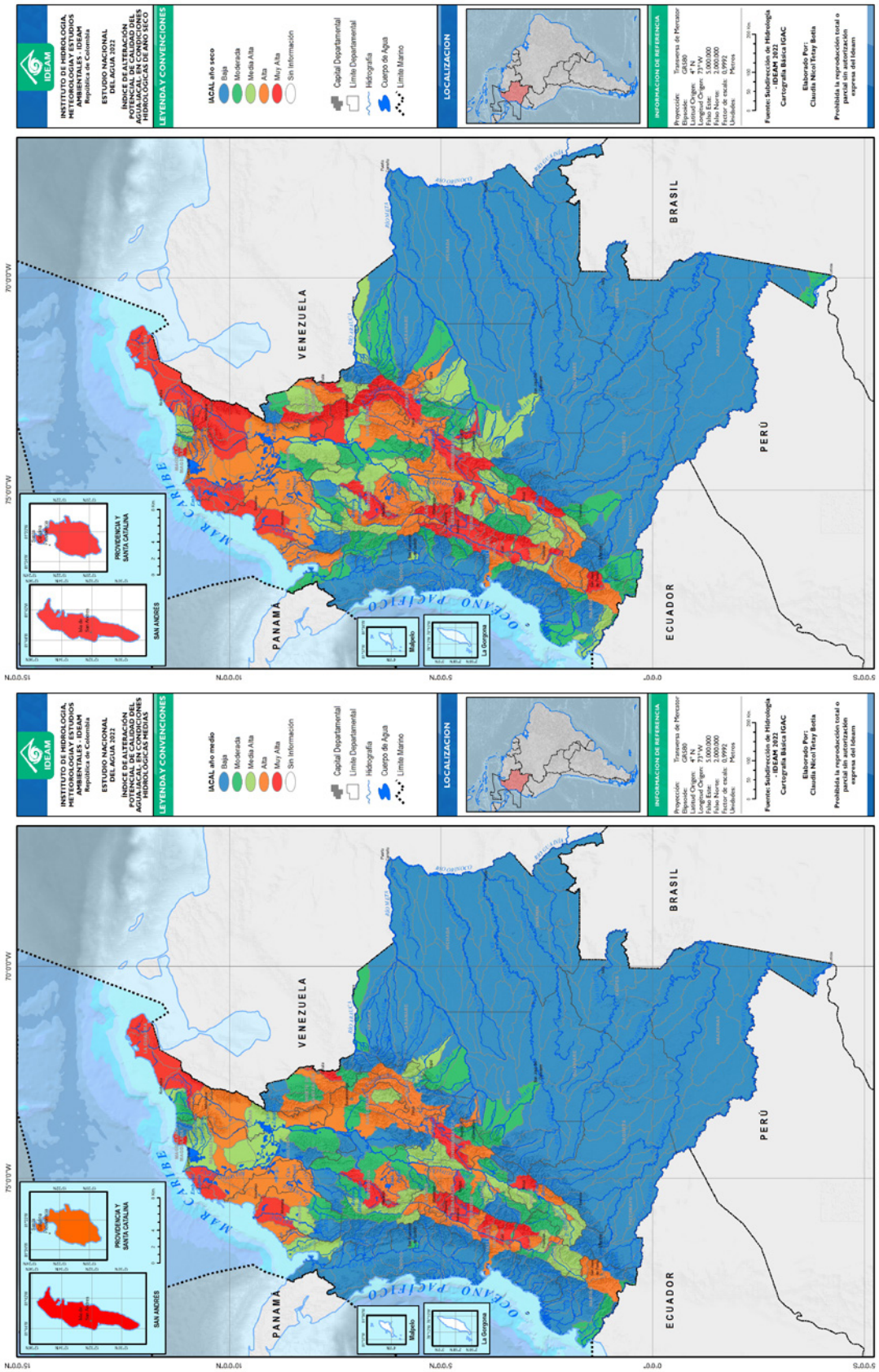



Figura 248. Índice de alteración potencial de la calidad del agua (IACAL) año medio y seco 2022.

la SZH Río Guatiquía, pasando de categoría «alta» a «media alta»; la SZH Lago de Tota y, manteniéndose en esta misma categoría, la SZH Río Cravo Sur.

En las áreas hidrográficas Amazonas y Pacífico, en 2022, no se encuentra ninguna SZH en categoría «muy alta», La subzona Río Juanambú pasó de categoría «muy alta» en 2018 a «alta» en 2022. Otras SZH que fueron «altas» en 2022: Río Mayo, Río Guáitara y Dagua Buenaventura Bahía Málaga.

### IACAL en condiciones hidrológicas de año seco

Para condiciones hidrológicas de año seco en este ítem, se relacionan por área hidrográfica las SZH con presiones por contaminación «muy alta» o «alta», teniendo como base los resultados del indicador.

En condiciones extremas de año seco, en el área hidrográfica del Caribe se encontraron 12 SZH en categoría «muy alta», las cuales fueron: Directos Caribe golfo de Morrosquillo, Arroyos directos al Caribe, Bajo Sinú, Río Piedras - Río Manzanares, Río Camarones y otros directos Caribe, Río Ranchería, Directos Caribe - Ay. Sharimahana Alta Guajira, Río Carraipía - Paraguachón, Directos al golfo Maracaibo, Río Pamplonita, Río Algodonal (Alto Catatumbo), San Andrés, Providencia.

En el área hidrográfica Magdalena-Cauca, en condiciones de año seco, las SZH Río Chicamocha, Alto Río Cauca, Río Palo, Ríos Pescador-RUT-Chanco-Catarina y Cañaveral, Río Frío, Río Risaralda, Río Tapias y otros directos al Cauca, Ríos Claro y Jamundí, Ríos Guabas, Zabaletas y Sonso; Río Bugalagrande, Río Paila, Alto Cesar, Medio Cesar, Río Ariguaní, Directos al Bajo Magdalena entre El Plato y Calamar (MI) y Canal del Dique margen izquierda registraron categoría «muy alta», adicional a las SZH registradas en año medio. En categoría «alta» aumentaron las SZH Alto Magdalena, Ríos directos al Magdalena (mi), Río Baché, Río Aipe, Río Chenche y otros directos al Magdalena, Río Seco y otros directos al Magdalena, Río Tetuán, Río Ortega, Río Negro, Río Fonce, Río Palacé, Río Arma, Río San Juan, Directos Río Cauca entre río San Juan y Puerto Valdivia, Río Piendamó, Bajo Cesar, Ciénaga Grande de Santa Marta, Directos Bajo Magdalena entre El Banco y El Plato, Ríos Chimicuica y Corozal, adicionales a las registradas en año medio.
En el área hidrográfica Orinoco, en 2022, se presentaron dos SZH con categoría «muy mala» a diferencia del 2018; estas fueron Río Guatiquía y Lago de Tota. La subzona hidrográfica que se mantuvo en la condición «alta» fue Río Garagoa. La de Río Cravo Sur pasó de «media alta» en año medio a «alta» en año seco.

## 8.4 Ventana regional cuenca Río Bogotá

La ventana regional resalta la importancia de implementar y fortalecer las redes de referencia regional de calidad del agua en las autoridades ambientales regionales, con el objetivo de generar mejor y más información a una resolución que permita brindar conocimiento y evaluar las condiciones de la calidad del agua a nivel regional, y en coherencia con la evaluación nacional; esto, soportado en el monitoreo de las redes nacional y regional para el cumplimiento de la misionalidad institucional.

De acuerdo con lo anterior, en el ENA 2022 se analizará la ventana regional de la cuenca del Río Bogotá con base en la información generada por la Red de Referencia Regional de Calidad del Agua de la Corpo-ración Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR).

La ventana regional contiene el análisis de las condiciones de la calidad del agua a partir de las concentraciones de diferentes parámetros y del índice de calidad del agua; estos se analizan a la altura de los puntos de monitoreo ubicados sobre la corriente principal y afluentes; también se analizan la presión sobre la cuenca a partir del cálculo de cargas contaminantes vertidas a nivel subsiguiente y el índice de alteración potencial de la calidad del agua (IACAL).

La cuenca hidrográfica Río Bogotá se encuentra localizada en el departamento de Cundinamarca y está conforma por 45 municipios y el Distrito Capital, desde el nacimiento del río Tunjuelito en la laguna de los Tunjos, en el páramo de Sumapaz. El río Bogotá constituye la corriente principal de la cuenca; desde su nacimiento a los 3300 m s. n. m. en el páramo Guacheneque en el municipio de Villapinzón hasta su desembocadura en el río Magdalena a 280

m s. n. m. en el municipio de Girardot; recorre un total de 308 kilómetros (Alcaldía Mayor de Bogotá D. C., 2019).

### 8.4.1 Análisis de la calidad del agua a partir de la concentración analizada en los puntos de monitoreo corriente principal y afluentes

En las Figura 249 y Figura 250 se observan los puntos monitoreados en dos campañas realizadas en el 2021; cada uno de los mapas representa (a través del tamaño de los círculos) las concentraciones de carbono orgánico total (COT), demanda química de oxígeno (DQO), coliformes totales (CT), oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (CE) y sólidos totales (ST), variables que reflejan intervención antrópica por posibles vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales.

En la primera campaña, realizada en el año 2021, se monitorearon 73 puntos de la Red de Referencia Regional de Calidad del Agua de la CAR; las mayores concentraciones se presentaron en los puntos: Quebrada La Tenería, con 81,34 (mg/L) de COT y con 92.080.000 NMP/100 ml (NMP, número más probable) de coliformes totales (CT) a la altura del municipio de Chía; Río Apulo, con 861 mg $O^2$/L de DQO y 4194 mg/l de sólidos totales (ST) a la altura del municipio de Apulo; Río Negro antes de confluir al río Bogotá, 1898 µS/cm de CE a la altura del municipio de Zipaquirá; descarga humedal Jaboque, 0,07 mg/l de OD a la altura de la ciudad de Bogotá; los puntos anteriores mencionados son afluentes de la corriente del río Bogotá.

En la segunda campaña del año 2021, se monitorearon 73 puntos de la Red de Referencia Regional de Calidad del Agua de la CAR; las mayores concentraciones se presentaron en los puntos Río Negro, antes de confluir al río Bogotá, con 65,68 (mg/l) de COT; 1605 µS/cm de CE y 0,00 mg/l de OD, punto ubicado a la altura del municipio de Zipaquirá; Río Fucha, 64.880.000 NMP/100 ml de CT a la altura de la ciudad de Bogotá; Aguas Abajo Río Balsillas, 415 mg O2/l de DQO, ubicada en el municipio de Soacha; Estación Puente Caldas Río Chécua, 1134 mg/l de ST a la altura del municipio de Nemocón; los puntos antes mencionados son afluentes de la corriente del río Bogotá.

### 8.4.2 Índice de calidad del agua

El *índice de calidad del agua* en la cuenca Río Bogotá en 2021 se calculó con las mediciones de las seis variables (OD, DQO, SST, CE, pH, relación NT/PT), teniendo en cuenta información registrada en dos monitoreos realizados en 73 puntos, de los cuales 43 se encuentran ubicados sobre la corriente principal y 30 en los afluentes.

En el mapa de la Figura 251 se observan los resultados de ICA para los 73 puntos de monitoreo en las dos campañas y el estado de la calidad de agua, según la categorización del índice que van desde «aceptable» hasta «muy malo».

En el monitoreo 1, los puntos Estación LG Saucio (ubicado a la altura del municipio de Chocontá) y LG La Isla (ubicado en la ciudad de Bogotá) presentan categoría «muy mala» del ICA; esta condición se observa por concentraciones bajas en OD, valores por encima de los 300 S/cm de CE, SST y relación de nutrientes representado por el NT y el PT.

En el monitoreo 2, la Estación Puente Caldas Río Chécua (ubicado en el municipio de Nemocón) y Aguas Abajo Río Balsillas (ubicado en el municipio de Soacha) se encontraron en categoría «muy mala» influenciados por las variables OD en concentraciones por debajo de 2, valores altos en CE, SST y relación de nutrientes representado por el NT y el PT.

Sobre la corriente principal del río Bogotá, se encuentran ubicados 43 puntos de monitoreo que hacen parte de la red de referencia regional. El punto más alto está ubicado en el municipio de Villapinzón, a 2648 m s. n. m., y el más bajo en el municipio de Girardot, a 302 m s. n. m. En la Figura 252 se observa el comportamiento del indicador en los monitoreos 1 y 2 realizados durante el 2021 a lo largo de la corriente principal.

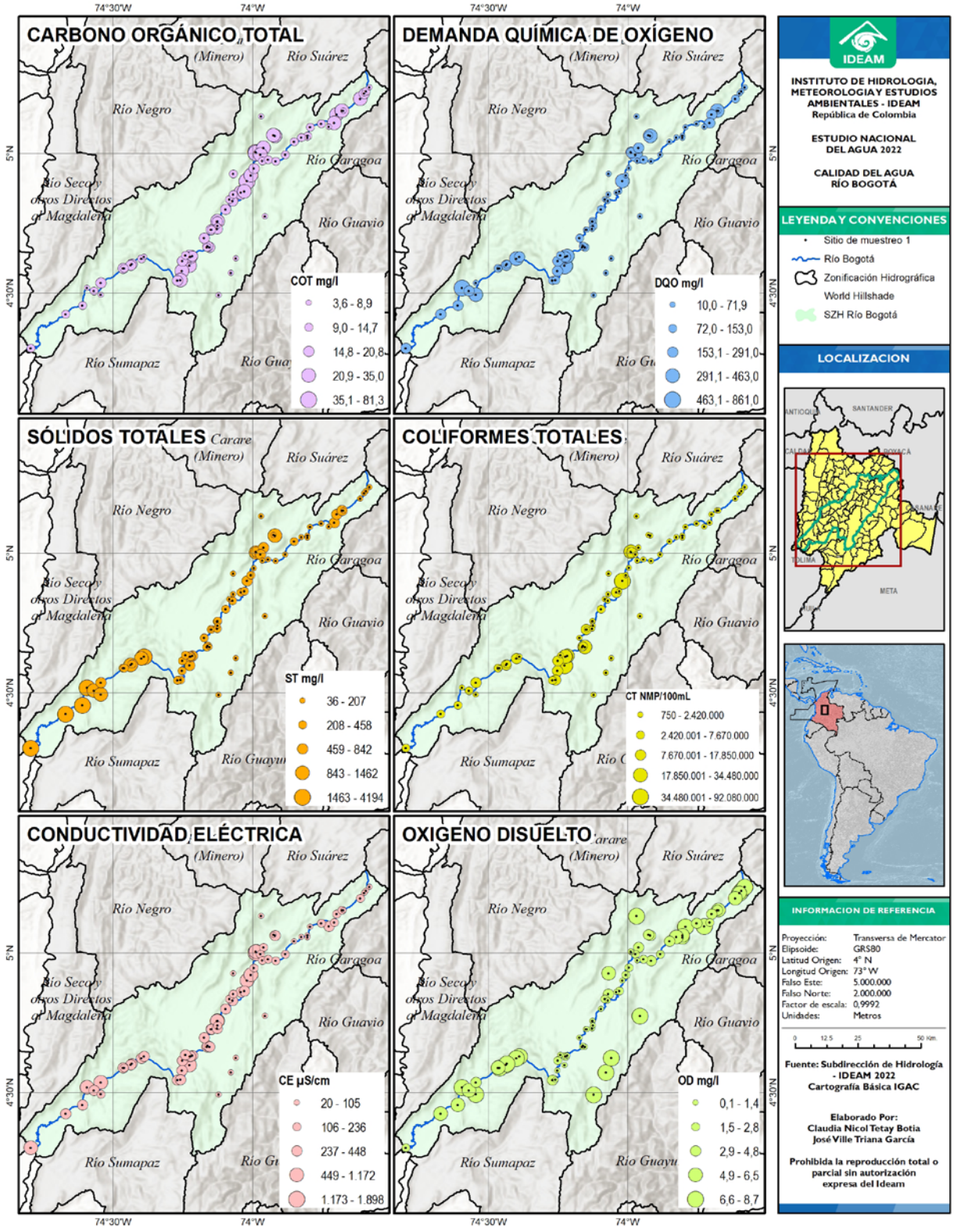



Figura 249. Variables de calidad del agua en los puntos de monitoreo a partir de concentración de carbono orgánico total, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, coliformes totales, demanda química de oxígeno y sólidos totales (muestreo 1).

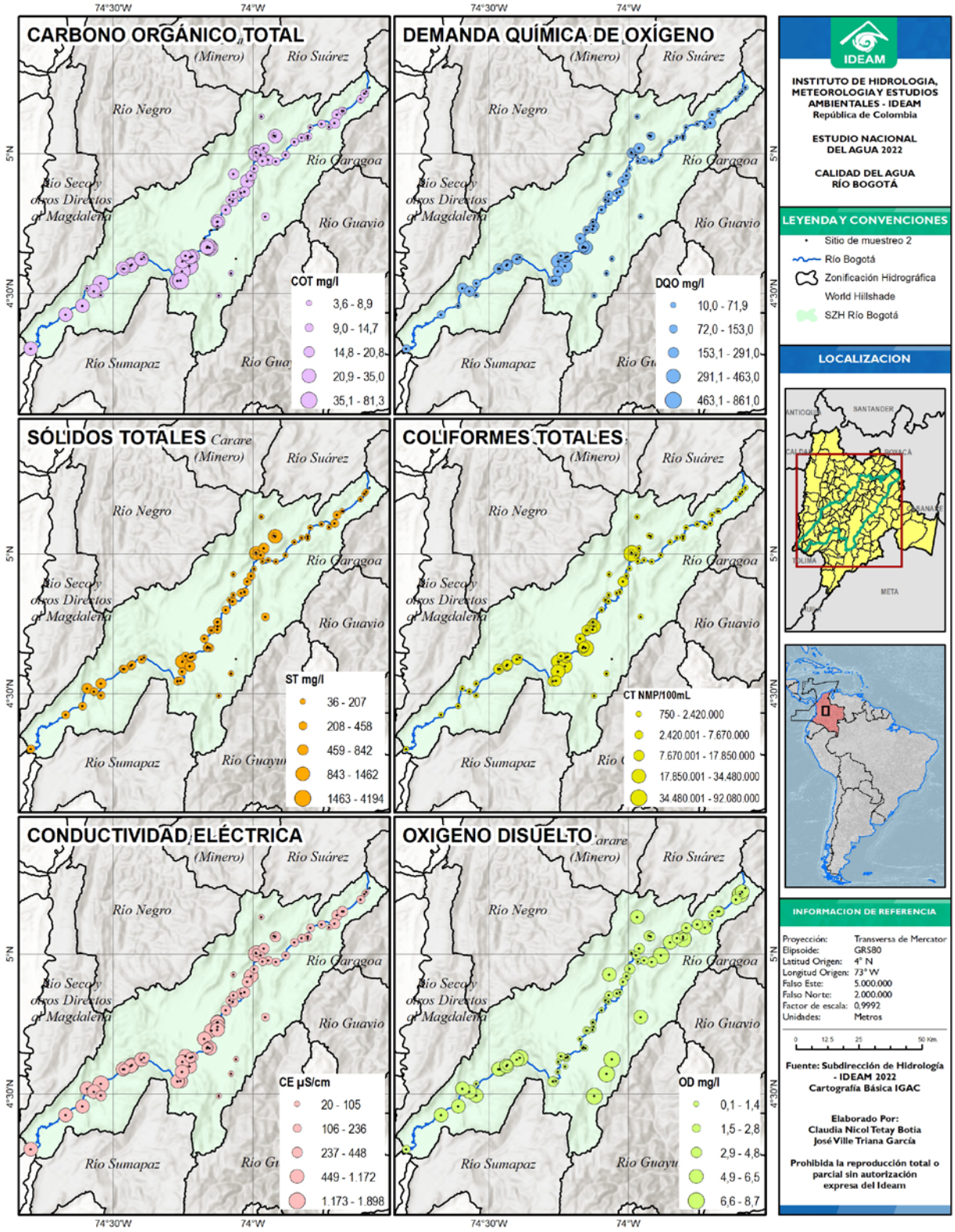
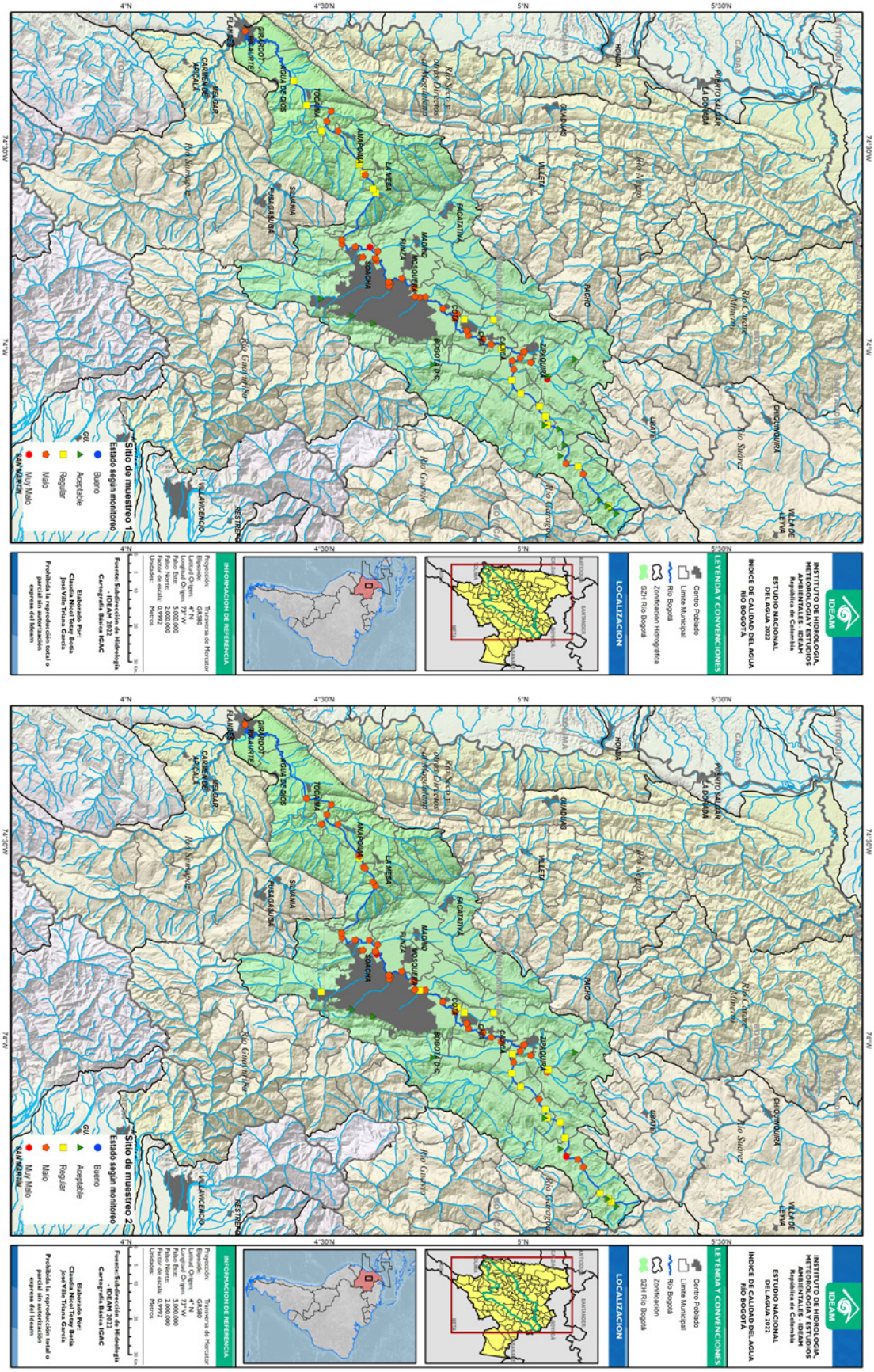



Figura 250. Variables de calidad del agua en los puntos de monitoreo a partir de concentración de carbono orgánico total, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, coliformes totales, demanda química de oxígeno y sólidos totales (muestreo 2).


INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES
República de Colombia
ESTUDIO NACIONAL DEL AGUA 2022
INDICE DE CALIDAD DEL AGUA RIO BOGOTA
LEYENDA Y CONVENCIONES
Centro Poblado
Limite Municipal
Rio Bogotá
Zonificación
SZH Rio Bogotá
LOCALIZACION
INFORMACION DE REFERENCIA
Sitio de muestreo 1
Estado según monitoreo
Bueno
Aceptable
Regular
Malo
Muy Malo
Río Bogotá
Río Suárez
Río Chicamocha
Río Minero
Río Negro
Río Ubaté
Río Simijaca
Río Ginebrá
Río Checua
Río Frío
Río Susa
Río Neusa
Río Tominé
Río Siecha
Río Guatiquía
Río Blanco
Río Negro
Río Chipaque
Río Tunjuelo
Río Fucha
Río Salitre
Río Juan Amarillo
Río Arzobispo
Río Negro
Río Teusacá
Río Chicú
Río Chuza
Río Guavio
Río Garagoa
Río Lengupá
Río Upía
Río Humea
Río Cusiana
Río Pauto
Río Cravo Norte
Río Casanare
Río Ariporo
Río Tame
Río Arauca
Río Cobaria

El comportamiento del indicador a lo largo de la corriente principal del río Bogotá mantiene la tendencia en los dos monitoreos realizados en el año. El ICA varía entre «aceptable», «malo», «muy malo» y «regular». En la parte más alta se encuentra en categoría «aceptable»; más adelante, en el municipio de Chocontá la condición cambia a «mala» en el primer monitoreo, pero en el segundo cambia a «muy mala»; este cambio se dio por el aumento en la concentración de DQO y SST; luego se recupera la condición pasando a categoría «regular» entre los municipios de Suesca y Gachancipá, y volviendo de nuevo a «mala» en el municipio de Chía; en esa condición se mantiene hasta el municipio de Mesitas del Colegio, pero antes de la desembocadura al río Magdalena su condición regresa nuevamente a categoría «mala».

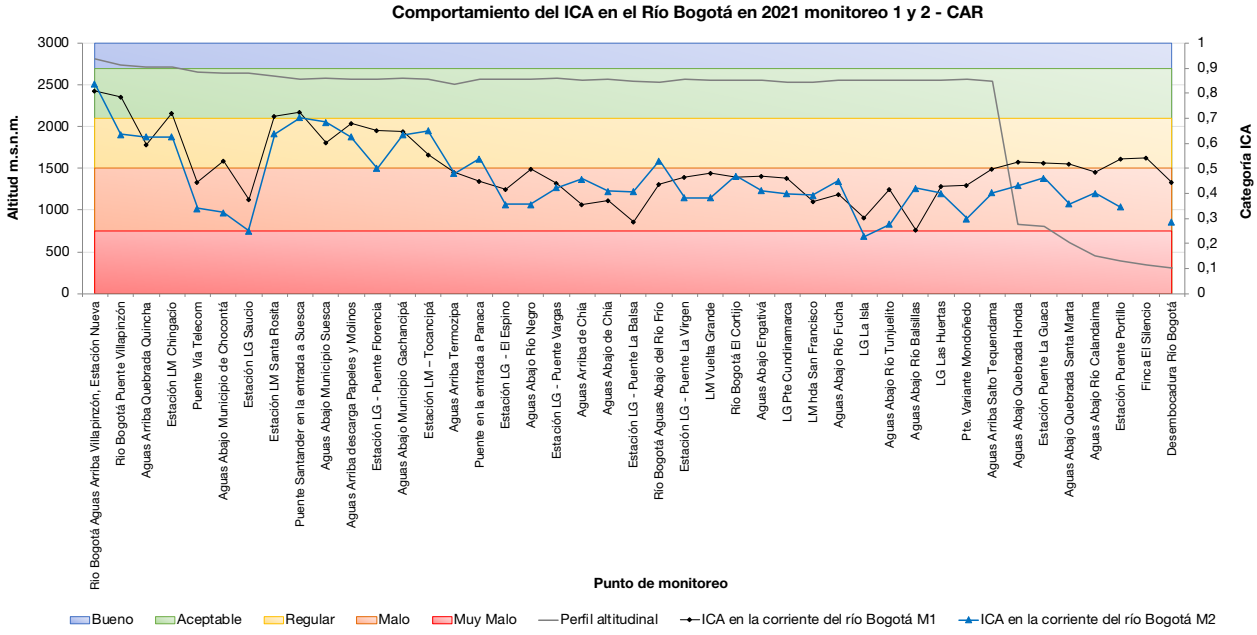



Figura 252. Índice de calidad del agua en el río Bogotá 2021, CAR

## 8.4.3 Presión sobre la calidad del agua

En este punto se presentan los cálculos de cargas contaminantes puntuales generadas y removidas, y las que al final son vertidas a los sistemas hídricos de la cuenca del río Bogotá en el nivel subsiguiente, como se observa en la Figura 253.

La cuenca Río Bogotá se divide en tres niveles subsiguientes para el análisis de las cargas generadas por diferentes sectores. En la sumatoria total de cargas, en la cuenca alta, la DBO representa el 1 %; en la cuenca media, representa el 31 %; y en la cuenca baja, representa el 68 %, manteniendo la misma participación en las demás variables.

## 8.4.4 Índice de alteración potencial de la calidad del agua

En la cuenca Río Bogotá se calculó el indicador para condiciones hidrológicas *medias* y *secas.* En la Tabla 77 se presentan los resultados del indicador y su categoría por nivel subsiguiente.

De acuerdo con los resultados del IACAL, en los tres niveles: en la cuenca alta la categoría es «media alta» y en la cuenca media la categoría esa «muy alta» en los dos escenarios hidrológicos; en la cuenca baja cambia a «media alta» en año medio y a «alta» en año seco.

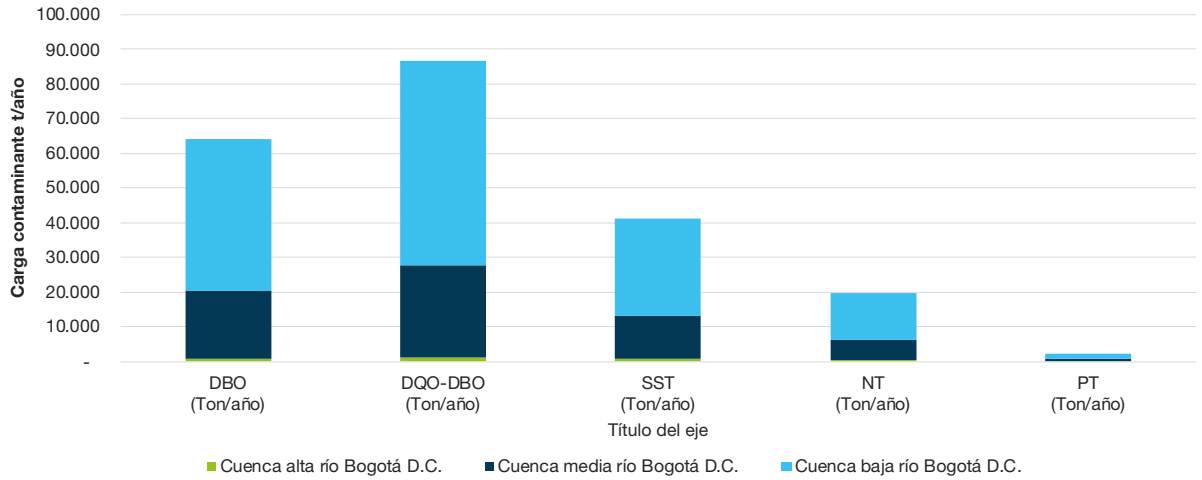



Figura 253. Cargas contaminantes vertidas a nivel subsiguiente en la cuenca del río Bogotá.

Tabla 77. Índice de alteración potencial de la calidad del agua (IACAL), río Bogotá.

| Cuenca | Escenario hidrológico medio | | Escenario hidrológico seco | |
|---|---|---|---|---|
| | Categoría de clasificación | Calificación de la presión | Categoría de clasificación | Calificación de la presión |
| Cuenca alta río Bogotá D. C. | 3 | Media alta | 3 | Media alta |
| Cuenca media río Bogotá D. C. | 5 | Muy alta | 5 | Muy alta |
| Cuenca baja río Bogotá D. C. | 3 | Media alta | 4 | Alta |

## 8.5 Uso de plaguicidas en Colombia

La degradación del medio ambiente es una de las principales problemáticas que enfrenta la humanidad en el siglo XXI. El aire, el agua y el suelo están contaminados por productos químicos peligrosos de diversa estructura, incluidos los bifenilos policlorados (PCB), los metales pesados y los contaminantes orgánicos emergentes (COE), entre estos los plaguicidas; las concentraciones de estos productos en el ambiente son más altas en los países en desarrollo, en las economías en transición y con población rural que vive en entornos agrícolas cercanos a fuentes hídricas, donde el aire y el suelo pueden estar afectados, lo que causa un impacto negativo en la salud humana y en el medio ambiente. En cuanto al agua potable, la contaminación química pone en riesgo de sufrir efectos adversos para la salud a más de mil millones de personas en el mundo; las comunidades más afectadas son las socioeconómicamente desfavorecidas y marginadas (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2021); (Amrose et al., 2020); (Ramírez et al., 2018).

A nivel mundial, la fabricación de ingredientes activos de plaguicidas aumentó de 1,9 millones de toneladas en 2008 a 2,8 millones de toneladas en 2016 (World Health Organization, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2019). En cuanto al registro y clasificación de sustancias químicas, la Sociedad Americana de Química (ACS, por sus siglas en inglés), en uno de sus informes en 2019, estimó que el número total de productos químicos industriales en el comercio mundial era de 40.000 a

60.000, con 6000 de estos que representaron más del 99 % del volumen total (United Nations Environment Programme, 2019). Según el Banco Mundial, el uso de plaguicidas de síntesis química se ha incrementado en Colombia en un 360 % en los últimos 20 años, sin que existiera una regulación que controlara las sustancias más peligrosas. Aunque la evidencia científica ha demostrado que estas sustancias son capaces de generar cáncer y otros efectos en los sistemas endócrino, metabólico y neurológico, en Colombia se habrían utilizado diez ingredientes activos representados en ochenta productos con registro de venta, prohibidos en otros países del mundo a 30 de abril de 2020 (Henao y Gómez, 2021).

Uno de los problemas más críticos derivados de la contaminación ambiental es el grave impacto que la contaminación química tiene en la calidad del agua destinada al consumo humano; ya que diariamente se liberan residuos de plaguicidas de forma directa e indirecta en los sistemas acuáticos, estos tóxicos pueden producir efectos negativos en la salud humana, lo cual ha llegado a convertirse en un serio problema de salud pública (World Health Organization, 2018).

A nivel mundial, la atención se ha centrado en el cuidado de la salud y en garantizar la seguridad del agua potable. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y la agenda 2030 son motores clave para los sistemas sostenibles y la calidad del agua (Naciones Unidas, 2016). Para la evaluación de las fuentes hídricas abastecedoras y el diagnóstico de los peligros potenciales aferentes a las bocatomas, la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda implementar un enfoque de gestión de prevención de riesgo para la priorización de peligros y la identificación sistemática de agentes patógenos y sustancias potencialmente tóxicas presentes en abastecimientos de aguas (World Health Organization, 2018).

La OMS y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO, por sus siglas en inglés) —en el informe de la encuesta mundial para describir la situación actual con respecto al manejo de plagas en la agricultura y la salud pública en el año 2018— relacionaron a Colombia entre los diez países con más uso de plaguicidas, como uno de los principales consumidores agrícolas en el mundo de un total de 194 países encuestados (World Health Organization, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2019). En el marco de la legislación colombiana, los plaguicidas en actividades como la agricultura se consideran sustancias peligrosas que alteran la calidad del agua en sus parámetros químicos; y el riesgo de contaminación en la fuente puede afectar la salud humana e inclusive causar desabastecimiento a una comunidad (Ministerio de Salud y Protección Social, Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017).

La agricultura en nuestro país y en el mundo es una actividad fundamental para el ser humano. Sin embargo, el impacto medioambiental por el efecto negativo a las aguas dulces persiste y se constituye en uno de los factores más generalizados de la mala calidad del agua. La movilización de sedimentos supone un problema importante, sobre todo en el caso de los sistemas de producción de cultivos. Se han reportado estudios sobre concentraciones de productos químicos —como plaguicidas, fertilizantes y contaminantes pecuarios— que pueden superar los límites permisibles y entrar a las aguas dulces superficiales y subterráneas repercutiendo de manera directa en la flora y fauna de estos ecosistemas (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2021); (World Health Organization, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2019); (Carvalho, 2017).

En Colombia, la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) del Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE) en 2019 indicó que el total del uso del suelo fue de 50.102.269 hectáreas/país, reportando un 77,9 % (39.017.179 ha) de uso pecuario, seguido por bosques con el 10,3 % (5.175.846 ha); el uso agrícola fue del 9,2 % (4.617.116 ha) y otros usos tuvieron el 2,6 % (1.292.128 ha) (DANE, 2020) y (DANE, 2020a).

En el país, donde los plaguicidas hacen parte de las sustancias de interés en salud pública, las autoridades de salud realizan la vigilancia en la población con riesgo de exposición, en el marco del Programa de Vigilancia Epidemiológica de Plaguicidas Organofosforados y Carbamatos (VEO); igualmente, contribuyen a las actividades de la vigilancia sanitaria para el levantamiento de los mapas de riesgo de la calidad del agua para consumo humano, sobre

la presencia de plaguicidas usados en las actividades agrícolas cerca de las fuentes de abastecimiento de los sistemas de suministro de agua en el país (Presidencia de la República de Colombia., 1991); (Ministerio de Salud y Protección Social, 2018); (Ministerio de Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007); (Ministerio de Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007a); (Ministerio de Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

El objetivo del presente estudio es continuar describiendo de forma general la frecuencia de uso de plaguicidas por grupo químico, categoría toxicológica y cultivos blanco de aplicación, en los departamentos participantes en la vigilancia durante el periodo 2017-2021; y contribuir con información para la elaboración de informes para la toma de decisiones de gran importancia en la vigilancia de individuos con riesgo de exposición a plaguicidas a nivel local y con la vigilancia de la calidad del agua para consumo humano en el país.

### 8.5.1 Metodología

Se realizó un análisis descriptivo de la información resultante de la vigilancia de los individuos con riesgo de exposición a plaguicidas reportada por doce departamentos que participaron en el Programa de Vigilancia Epidemiológica de Plaguicidas Organofosforados y Carbamatos del Instituto Nacional de Salud (INS), periodo 2017 a 2021.

Las entidades territoriales de salud (ETS) realizan una entrevista a cada individuo con riesgo de exposición directa o indirecta a plaguicidas en diferentes actividades laborales, y oficios de tipo ocupacional y ambiental, previo consentimiento informado de su participación voluntaria; se administró un cuestionario estructurado para recolectar información de variables demográficas, ocupacionales, de exposición, uso y aplicación de plaguicidas en actividades o labores diarias de distribución, y aplicación en sistemas de producción agrícola, pecuaria y campañas sanitarias para el control de vectores en salud pública.

De igual manera, se recolectó información sobre el nombre de los seis plaguicidas más frecuentemente usados, los tres principales cultivos en donde se aplicaron y resultados de la medición de acetilcolinesterasa como biomarcador de exposición a plaguicidas inhibidores de la colinesterasa. La información fue digitada por cada ETS en una herramienta diseñada por el INS en Excel para registrar de forma sencilla la información recolectada en la entrevista; una vez diligenciada es enviada al INS.

La novedad temática en este informe con respecto al Estudio Nacional del Agua 2018 y ediciones anteriores es la incorporación de información en la vigilancia sobre los productos que más refirieron sembrar o producir, grupos de cultivos (transitorios y asociados) blanco de aplicación de los plaguicidas, según la clasificación citada en la Encuesta Nacional Agropecuaria del DANE, 2019.

Se realizó depuración y ajuste de las bases de datos reportadas por cada ETS; se excluyeron los reportes sin información de las variables departamento y resultado de la acetilcolinesterasa (basal o por exposición), considerando este biomarcador clave en la vigilancia de individuos con riesgo de exposición. Se estimaron frecuencias simples y proporciones de uso de plaguicidas por grupo químico, categoría toxicológica y cultivos blanco de aplicación. Estas estimaciones se efectuaron a escalas nacional, departamental y municipal y los datos fueron procesados en los programas MS Excel y el software estadístico R versión 4.1.3.

### 8.5.2 Uso de plaguicidas 2017-2021

Durante el periodo de estudio de 2017 a 2021, reportaron información al programa de vigilancia 23.623 individuos con riesgo de exposición a plaguicidas organofosforados (OF) y carbamatos (C) por uso, manipulación o por habitar en áreas cercanas a las zonas de aplicación e influencia de estos agrotóxicos. Cada participante registró hasta seis nombres de los plaguicidas formulados, distribuidos, vendidos o empleados con más frecuencia en sus labores diarias, por lo que se recolectó un total de 64.456 datos de estas sustancias en doce departamentos del país.

Los plaguicidas usados con más frecuencia, por grupo químico, fueron los organofosforados con el 30,8 % (19.844), seguidos por el grupo de ácido fos-

fónico con el 18,2 % (11.746); otros compuestos clorinados, con 13,1 % (8433), y piretroides con el 10,7 % (6898); el reporte de compuestos organoclorados en el total informado cada año disminuyó durante el periodo, pasando de 3,8 % durante 2013 a 1,6 % (1005) en 2016; igualmente, el uso de carbamatos disminuyó de manera considerable con relación a años anteriores, pasando de 13,1 % a 4,4 % (2845) (Figura 254).

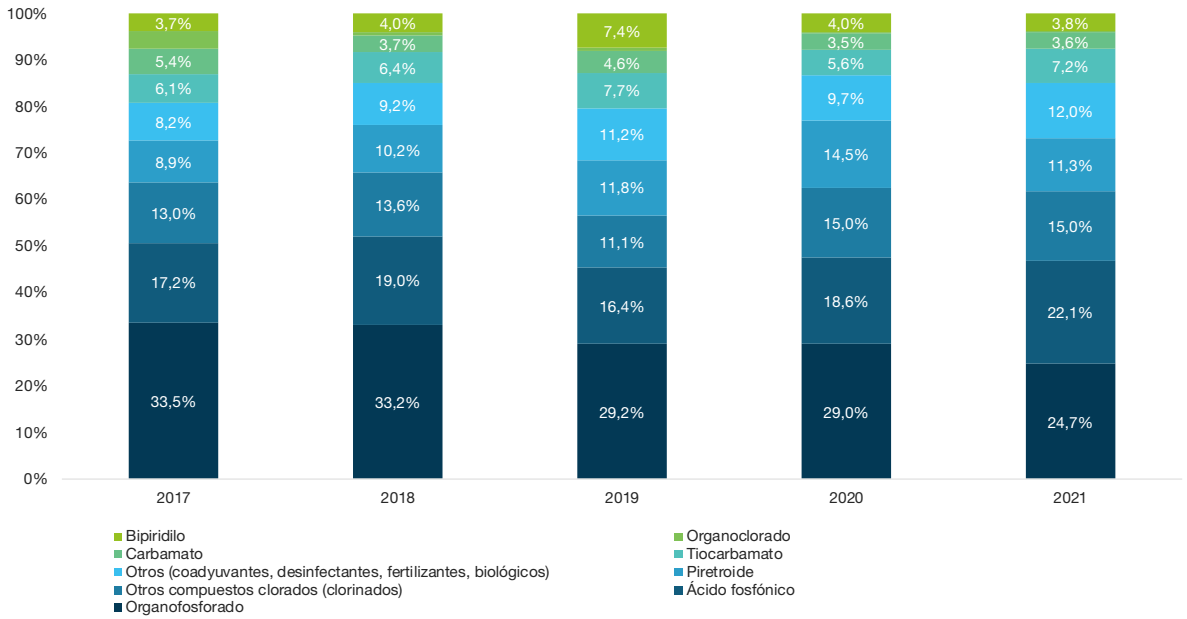



Figura 254. Porcentaje de uso de plaguicidas por grupo químico, Colombia, 2017-2021.
Fuente: información Programa de Vigilancia Epidemiológica de Plaguicidas Organofosforados y Carbamatos – VEO, 2017-2021, Dirección Redes en Salud Pública, INS.

Tabla 78. Porcentaje de uso de plaguicidas por categoría toxicológica, Colombia, 2017-2021.

| OMS (guías de clasificación 2019) | | | |
|---|---|---|---|
| **Categoría toxicológica** | | **Total** | |
| **Ia** | Sumamente peligroso | 216 | 0,3 |
| **Ib** | Muy peligroso | 3640 | 5,6 |
| **II** | Moderadamente peligroso | 36.791 | 57,1 |
| **III** | Ligeramente peligroso | 15.175 | 23,5 |
| **U** | Improbable que presente riesgo agudo en uso normal | 6321 | 9,8 |
| **O** | Obsoleto o descontinuado para uso como plaguicida no clasificado | 21 | 0 |
| ** | No clasificada por la OMS | 2292 | 3,6 |
| **Total** | | **64.456** | **100** |

Fuente: información Programa de Vigilancia Epidemiológica de Plaguicidas Organofosforados y Carbamatos – VEO, 2017-2021, Dirección Redes en Salud Pública, INS.

Según las categorías de toxicidad de los plaguicidas, de la clasificación toxicológica establecida por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2019 (Tabla 78) y en 2020, el mayor uso de plaguicidas reportado correspondió a la categoría toxicológica de «moderadamente peligroso» (categoría II) con el 57,1 % (36.791) del total de los datos reportados; lo siguió el grupo de «ligeramente peligroso» (categoría III) con 23,5 % (15.175). También se observa que hubo una disminución del uso de plaguicidas de la categoría «sumamente peligroso» (categoría Ia) con un 0,3 %, al igual que para los «muy peligrosos» (categoría Ib) en 5,6 %.

En relación con el uso de plaguicidas durante el periodo de estudio, según el objeto blanco por controlar, el mayor uso promedio que reportaron las personas fueron los insecticidas 53,2 % (34.259), herbicidas 33,6 % (21.640) y fungicidas 12,6 % (8086); en menor proporción se reportaron otros (coadyuvantes, desinfectantes, fertilizantes y biológicos) con el 0,5 % (317) y rodenticidas 0,1 % (43).

En cuanto al porcentaje de participación y registro de plaguicidas, los departamentos con mayor reporte fueron Caldas con el 35,3 %, Antioquia (14,9 %) y Boyacá (8,4 %); y los que tuvieron menor reporte fueron Atlántico, Caquetá y Vichada, con menos del 3 % durante el periodo en cuestión (Tabla 79).

Tabla 79. Número de participantes y reporte de plaguicidas por departamento en doce departamentos de Colombia, 2017-2021.

| Entidades territoriales | 2017 | | 2018 | | 2019 | | 2020 | | 2021 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Número participantes | Número plaguicidas reportados | Número participantes | Número plaguicidas reportados | Número participantes | Número plaguicidas reportados | Número participantes | Número de plaguicidas reportados | Número participantes | Número plaguicidas reportados |
| **Antioquia** | 1699 | 6017 | 605 | 914 | 1114 | 2656 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Atlántico** | 324 | 480 | 317 | 844 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Boyacá** | 940 | 1465 | 1022 | 2022 | 1096 | 1905 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Caldas** | 1387 | 4806 | 1222 | 4426 | 1421 | 5074 | 658 | 2960 | 1170 | 5332 |
| **Caquetá** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 29 | 126 | 38 | 142 |
| **Meta** | 608 | 1380 | 354 | 977 | 240 | 628 | 90 | 282 | 0 | 0 |
| **Nariño** | 372 | 1024 | 0 | 0 | 688 | 1593 | 125 | 445 | 997 | 2403 |
| **Putumayo** | 144 | 434 | 167 | 510 | 350 | 958 | 184 | 474 | 218 | 469 |
| **Quindío** | 834 | 1698 | 904 | 1457 | 885 | 1182 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Risaralda** | 231 | 522 | 690 | 1819 | 1075 | 2102 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Sucre** | 275 | 1723 | 639 | 1884 | 0 | 0 | 124 | 356 | 351 | 886 |
| **Vichada** | 36 | 81 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Total** | **6850** | **19.630** | **5920** | **14.853** | **6869** | **16.098** | **1.210** | **4643** | **2774** | **9232** |

Fuente: información Programa de Vigilancia Epidemiológica de Plaguicidas Organofosforados y Carbamatos – VEO, 2017-2021, Dirección Redes en Salud Pública, INS.

En la Tabla 80, se presentan las diferencias en el uso de plaguicidas por grupo químico según departamento; la información está organizada según frecuencia de uso de plaguicidas en los territorios participantes. Se presenta la posición de cada uno de los plaguicidas en cada departamento con respecto al nacional; los colores muestran un gradiente que va entre verde y rojo, donde el rojo es el más reportado y el verde es el menos reportado; los amarillos son valores intermedios. Los departamentos que aparecen como los que más usaron productos organofosforados fueron Caquetá, Quindío y Vichada con reportes por encima del 40 %.

Tabla 80. Porcentaje de uso de plaguicidas por grupo químico y departamento, Colombia, 2017-2021.

| Departamento | Organofosforado | Carbamato | Tiocarbamato | Otros compuestos clorados (clorinados) | Otros (coadyuvantes, desinfectantes, fertilizantes, biológicos) | Ácido fosfónico | Piretroide | Bipiridilo | Organoclorado |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nacional | 31 % | 4 % | 7 % | 13 % | 10 % | 18 % | 11 % | 5 % | 2 % |
| Antioquia | 35 % | 4 % | 5 % | 11 % | 9 % | 14 % | 6 % | 8 % | 8 % |
| Atlántico | 25 % | 0 % | 0 % | 44 % | 1 % | 18 % | 1 % | 11 % | 0 % |
| Boyacá | 27 % | 10 % | 21 % | 8 % | 13 % | 4 % | 15 % | 1 % | 0 % |
| Caldas | 30 % | 2 % | 6 % | 16 % | 12 % | 21 % | 11 % | 1 % | 1 % |
| Caquetá | 66 % | 0 % | 0 % | 0 % | 3 % | 0 % | 31 % | 0 % | 0 % |
| Meta | 39 % | 13 % | 1 % | 5 % | 6 % | 18 % | 12 % | 7 % | 0 % |
| Nariño | 30 % | 10 % | 12 % | 5 % | 10 % | 13 % | 16 % | 3 % | 0 % |
| Putumayo | 18 % | 8 % | 4 % | 10 % | 7 % | 19 % | 11 % | 22 % | 1 % |
| Quindío | 46 % | 1 % | 3 % | 3 % | 6 % | 22 % | 19 % | 0 % | 1 % |
| Risaralda | 32 % | 5 % | 8 % | 13 % | 14 % | 19 % | 8 % | 1 % | 2 % |
| Sucre | 20 % | 0 % | 0 % | 26 % | 3 % | 31 % | 4 % | 15 % | 0 % |
| Vichada | 41 % | 6 % | 0 % | 0 % | 14 % | 6 % | 33 % | 0 % | 0 % |

Fuente: información Programa de Vigilancia Epidemiológica de Plaguicidas Organofosforados y Carbamatos-VEO, 2017-2021, Dirección Redes en Salud Pública, INS.

Durante el periodo 2017 a 2021, según los ríos principales del país, se puede determinar un uso extendido de plaguicidas en las zonas (sombreadas en amarillo) con reporte de uso de plaguicidas, focalizados en mayor parte de la zona central o parte media del altiplano de la cuenca Magdalena-Cauca, seguidos del borde suroccidental de las cuencas Pacífico y Amazonas, y en menor extensión en las cuencas Caribe y Orinoco (Figura 255).

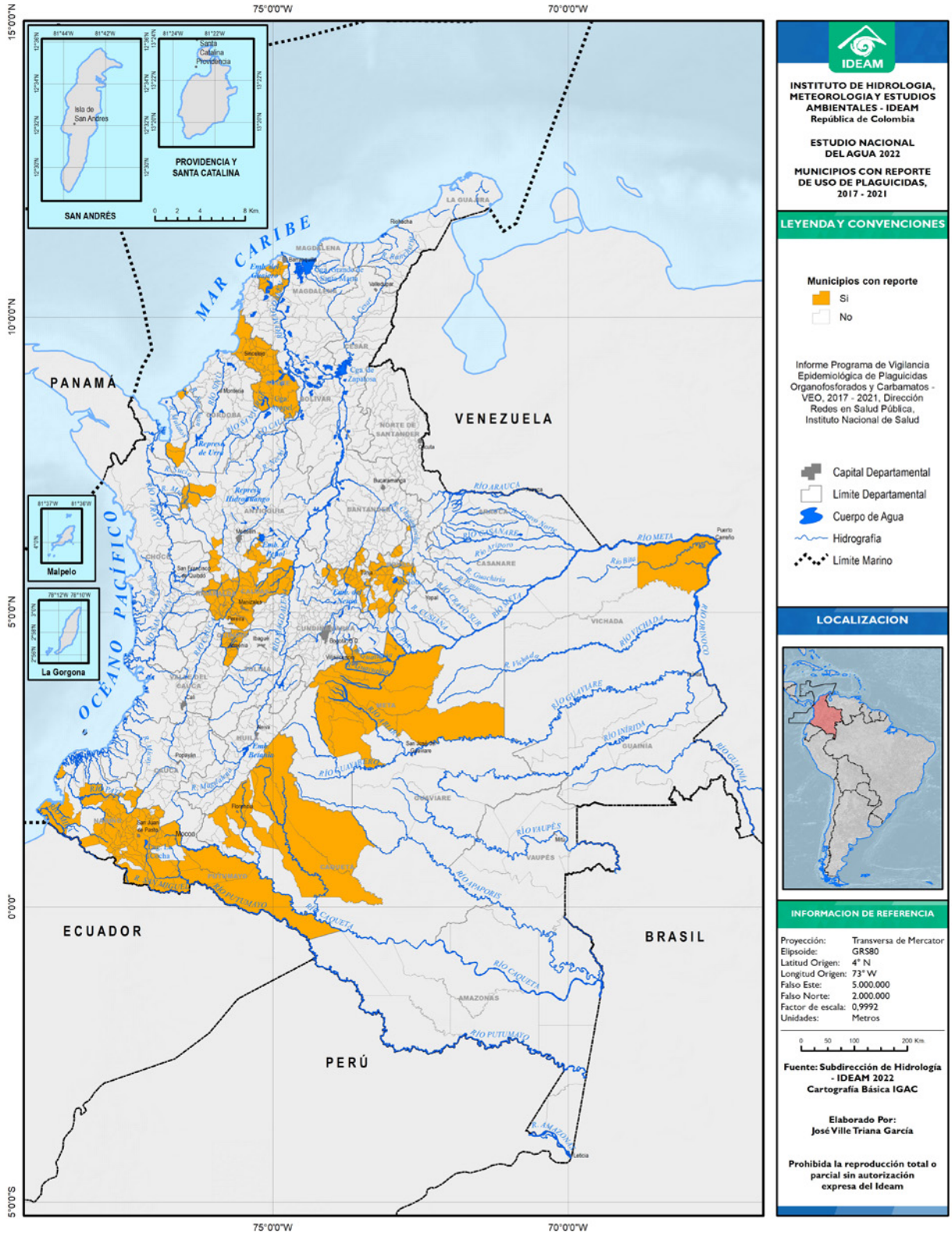



Figura 255. Municipios con reporte de uso de plaguicidas, Colombia, 2017-2021
Fuente: información Programa de Vigilancia Epidemiológica de Plaguicidas Organofosforados y Carbamatos-VEO, 2017-2021, Dirección Redes en Salud Pública, INS.

Para el periodo de análisis, 252 municipios reportaron información de plaguicidas al programa VEO del INS; el 69,8 % de estos se encontraban en cinco departamentos: Boyacá (con reporte de información en 53 municipios), Nariño (47), Caldas (27), Sucre (26) y Meta (23). Respecto a las zonas hidrográficas marcadas, son relevantes los departamentos y municipios con características de relieve de partes altas, medias bajas que captan agua y sedimentos de los tributarios de diferente orden, tales como nacimientos de agua, arroyos, quebradas y ríos, hasta desembocar en los ríos principales del país que dan origen a las cuencas mencionadas.

Frente al uso de plaguicidas por grupo químico, algunos de los municipios que tuvieron un mayor reporte de plaguicidas organofosforados respecto al total fueron: Ciudad Bolívar (Antioquia), Chinchiná, La Dorada, La Merced, Marquetalia, Palestina y Risaralda (en Caldas) y Villavicencio (en Meta). En cuanto al uso de plaguicidas con componentes de ácido fosfónico, el reporte en el uso se presentó en municipios de Antioquia (Ciudad Bolívar y San Juan de Urabá), Caldas (Chinchiná, Filadelfia, La Merced, Neira y Palestina), Risaralda (Dosquebradas) y Sucre (San Juan de Betulia).

**Cultivos blanco de aplicación.** Respecto a los tres principales cultivos blanco de aplicación de los plaguicidas para el periodo analizado, de un total de 37.268 reportes, el 22,9 % refiere producir calabacín, un 13,6 % aguacate, el 6,1 % melón, un 5,5 % piña y marañón-merey. No obstante, el tipo de cultivo puede variar por departamento. Del total de los cultivos reportados, los departamentos con un porcentaje más alto de información sobre este aspecto durante el periodo fueron Caldas, Antioquia y Boyacá. En el análisis de los tipos de cultivos por departamento se encontró que Caldas cultiva calabacín en el 31,2 % de los casos, aguacate 27,9 % y melón 9,9 %; por su parte, la mayor proporción de Antioquia es en cultivos de calabacín (24,3 %), melón (8,8 %) y gulupa-chulupa (7,8 %). Mientras que Boyacá tiene cultivos de piña (27,5 %), zapallo (12,5 %) y ciruela (9,6 %).

Con relación a grupos de cultivos reportados por departamento, según la clasificación citada en la Encuesta Nacional Agropecuaria (DANE 2019), se registró un 55,6 % (20.733) para el grupo de hortalizas, verduras y legumbres; seguido por frutales con el 34,3 % (12.780); tubérculos y plátano con el 4,4 % (1636); el 3,4 % (1269) de cereales y, finalmente, el grupo de árboles, flores y dispersos con el 2,3 % (850) de representatividad (Tabla 81).

Tabla 81. Número de cultivos reportados en Colombia por departamento, 2017-2021.

| Departamento | Número de cultivos | % | Hortalizas, verduras y legumbres | Frutales | Tubérculos y plátano | Cereales | Árboles, flores, dispersos |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Caldas** | 12.151 | 32,6 % | 8504 | 2950 | 400 | 128 | 169 |
| **Antioquia** | 5904 | 15,8 % | 2742 | 2212 | 637 | 194 | 119 |
| **Boyacá** | 4380 | 11,8 % | 1103 | 2407 | 225 | 434 | 211 |
| **Risaralda** | 3263 | 8,8 % | 2353 | 618 | 72 | 56 | 164 |
| **Quindío** | 2944 | 7,9 % | 2491 | 366 | 41 | 26 | 20 |
| **Nariño** | 2845 | 7,6 % | 1047 | 1356 | 25 | 363 | 54 |
| **Sucre** | 2520 | 6,8 % | 947 | 1499 | 59 | 6 | 9 |
| **Putumayo** | 1394 | 3,7 % | 685 | 581 | 31 | 62 | 35 |
| **Atlántico** | 940 | 2,5 % | 161 | 732 | 42 | - | 5 |
| **Meta** | 927 | 2,5 % | 700 | 59 | 104 | - | 64 |
| **Total** | **37.268** | **100,0 %** | **20.733** | **12.780** | **1636** | **1269** | **850** |

Fuente: información Programa de Vigilancia Epidemiológica de Plaguicidas Organofosforados y Carbamatos – VEO, 2017-2021, Dirección Redes en Salud Pública, INS.

Del total de registros evaluados para los diferentes grupos de cultivos no agroindustrializados, la diversificación agrícola que se está promoviendo y que se refleja en área sembrada, cosechada y producida con siembras pequeñas (minifundios) en las zonas encuestadas evidenció una gran multiplicidad de variedades que rondaron, entre todos, en cerca de ochenta diferentes tipos de siembras (Tabla 82).

Tabla 82. Grupos de cultivos, participación y siembra, Colombia 2017-2021

| Producción por grupos de cultivos | | |
|---|---|---|
| **Grupos de cultivos** | **% de participación** | **Variedad de siembras** |
| **Hortalizas, verduras y legumbres** | 55,6 % | Calabacín, aguacate, soya, zapallo, arveja, café, té, habichuela, pimentón, hortalizas, ají, habas, ruda, ajonjolí, ahuyama, repollo, macadamia, sábila, quinua, coliflor, espárragos, tomillo, cilantro, acelga, algodón, ajo, cacao, aromáticas, sorgo, espinaca, tomate, batavia, calabaza, guatila. |
| **Frutales** | 34,3 % | Melón, piña, marañón-merey, gulupa–chulupa, mango, pera, mangostino, ciruela, frutales, patilla–sandía, lulo, guayaba, zapote, limón, pitahaya, naranja, mandarina, papaya, curuba, chontaduro, maracuyá, granadilla, durazno, borojó, banano, feijoa. |
| **Tubérculos y plátano** | 4,4 % | Plátano, batata, papa, yuca, ñame, arracacha. |
| **Cereales** | 3,4 % | Avena, cebada, cereales, trigo, arroz. |
| **Árboles, flores, dispersos** | 2,3 % | Madera, flores, plantas ornamentales, fique, estropajo, palma de aceite, pastos potrero, maleza. |

Fuente: información Programa de Vigilancia Epidemiológica de Plaguicidas Organofosforados y Carbamatos – VEO, 2017-2021, Dirección Redes en Salud Pública, INS.

### 8.5.3 Discusión de resultados

El uso intensivo y extensivo de plaguicidas en actividades agrícolas, pecuarias y de control de vectores facilita su propagación generando contaminación en las diferentes fuentes de agua ambientales captadas para tratamiento y abastecimiento a la población. Es de considerar que, en estas actividades, un aspecto importante relacionado con el uso de plaguicidas es la generación y el manejo inadecuado de residuos peligrosos (como envases vacíos y bolsas con o sin aditivos, entre otros), lo que representa un riesgo de contaminación para las corrientes de agua natural de los ríos pertenecientes a vertientes hidrográficas del país (Camargo et al., 2021). En Colombia, el Estudio Nacional del Agua 2018 presentó datos de aumento potencial de contaminación microbiana y química en las diferentes fuentes de agua ambientales, considerando cambios significativos por amenazas naturales, asentamientos humanos, actividades agropecuarias y sectores productivos que aumentan el riesgo a la salud pública (Cárdenas et al., 2019).

Según la información reportada al programa de vigilancia, los plaguicidas más usados de importancia en salud por grupo químico fueron: los insecticidas organoclorados cuyo uso descendió, pasando de 8,4 % en 1998-2001 a 1,1 % en 2006-2009; mientras que para los compuestos clorinados se observó un leve ascenso, pasando de 6,6 % a 8,9 % en los mismos periodos (Cárdenas, O., 2005), (Cárdenas, O., 2010). Para el periodo 2012 a 2016, fueron los organofosforados, con un promedio de 35,3 % y carbamatos de 13,6 %; se resaltó el incremento en el uso de plaguicidas del grupo de ácido fosfónico, pasando de 8,3 % en 2013 a 14,7 % en 2016. Es im-

portante notar que el uso de compuestos organoclorados y tiocarbamatos disminuyó, pasando de 0,6 % a 0,5 % y de 14,6 % a 6,7 % en el periodo estudiado, respectivamente (Cárdenas, O., 2015), (Cárdenas, O., 2019), (Cárdenas O., 2012).

Estos resultados concuerdan con algunas sustancias químicas reportadas en los informes nacionales de la calidad del agua para consumo humano 2016-2018, en donde comunicaron sobre muestras de agua con metales, nitratos, nitritos, fluoruros, cianuros, trihalometanos, hidrocarburos aromáticos policíclicos y plaguicidas con un 45,7 % de organofosforados (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Ministerio de Salud y Protección Social, Instituto Nacional de Salud, Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2019). Durante 2019, se reportaron metales; y para plaguicidas, el 49,3 % para organofosforados en 181 municipios de dieciocho departamentos del país (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Ministerio de Salud y Protección Social, Instituto Nacional de Salud, Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2020). Para el 2020, según mapa de riesgos y por motivos de la pandemia, a pesar de la disminución en la información recibida de los departamentos siguieron reportándose los plaguicidas con más frecuencia usados a nivel nacional en orden de reporte: organofosforados, ácido fosfónico, compuestos clorinados, piretroides, bipiridilos, tiocarbamatos, carbamatos y compuestos organoclorados (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Ministerio de Salud y Protección Social, Instituto Nacional de Salud, Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2021).

A nivel mundial, los plaguicidas organofosforados han sido los más usados por ser menos persistentes en el medio ambiente. Sin embargo, algunos de ellos han sido restringidos por agencias internacionales, como la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés), con el fin de proteger la salud humana, de los animales y el impacto al medio ambiente, ya que han sido encontrados en aguas subterráneas y en cuerpos de agua superficial de América tropical (United Nations Environment Programme, 2019). Por lo general, en los países en vía de desarrollo los pequeños agricultores (en especial los del sector informal de la economía) tienden a emplear plaguicidas de categoría toxicológica mayor, los cuales funcionan contra una amplia variedad de plagas, incluidas aquellas difíciles de combatir y que pueden distribuirse para varios cultivos. Así, la contaminación del medio ambiente, y en particular el agua, se ha convertido en un problema global por los plaguicidas. Los principales grupos químicos involucrados en esta problemática son: organofosforados, organoclorados y carbamatos, entre otros (Van Dyk, 2011).

En el periodo 2017-2021, el reporte de información de vigilancia disminuyó de modo significativo en los dos últimos años debido a la pandemia de la COVID-19. Según lo informado por cada una de las entidades territoriales, los plaguicidas más usados de importancia en salud por grupo químico son los organofosforados, en términos de su participación relativa en el total de reportes; en este periodo, el porcentaje de participación fue del 30,8 %; en el periodo 2013-2016 fue del 34,5 %, y para 2012 fue del 40 %. Con respecto a los carbamatos, el uso fue del 4 % para 2017-2021; en principio, habría una disminución con respecto a los periodos 2013-2016 y 2012, donde hubo reportes del 13,1 % y 15,6 %, respectivamente; no obstante, esto pudo deberse a la situación de pandemia. El grupo de ácido fosfónico registró un 18,2 % en el periodo actual, que aumentó en contraste a lo registrado en el periodo 2013-2016 (14,7 %) y 2012 con un menor reporte (Cárdenas et al., 2019), (Cárdenas et al., 2015) y (Cárdenas et al., 2012).

El segundo grupo químico fue el de ácido fosfónico con el 18,2 %; de este, el 97,8 % corresponde al uso de glifosato; otros compuestos clorinados el 13,1 %, reportando principalmente el uso de amina 2,4-D con 46,0 %; es de notar que estos compuestos han tenido un aumento considerable con relación al periodo 2013-2016, donde el uso era de 9,4 %. El uso de piretroides fue del 10,7 %, con productos a base de cipermetrinas con el 63,4 %; para los tiocarbamatos con el 6,7 % y, de estos, el principal ingrediente activo fue el mancozeb, con el 72,6 %; los bipiridilos, con el 4,7 %; el paraquat fue el producto más utilizado; y para los organoclorados, con el 1,6 %, el endosulfán fue el más reportado, con el 97,3 %. Es importante notar que se siguen empleando plaguicidas de categoría toxicológica sumamente peligrosa, con productos como el endosulfán y el aldrín, pla-

guicidas prohibidos desde hace muchos años en el mundo (FAO y PNUMA, 2011), (ICA, 2021).

El uso de plaguicidas organofosforados se reportó con mayor frecuencia en los departamentos de Caldas, Antioquia y Boyacá, que emplean estos compuestos químicos en el sector agrícola y pecuario, y en el control de vectores en salud pública en sus municipios; sin embargo, esto no significa que son los que más usan estos compuestos químicos, sino que puede deberse a que tienen continuidad con la vigilancia de exposición a plaguicidas en salud pública, mayor cobertura y reporte en sus territorios. Los departamentos que tuvieron menor reporte de participantes, como Caquetá, Vichada y Quindío, que aparecen como los que más usaron plaguicidas organofosforados en mayor porcentaje y la principal actividad reportada fue en campañas para el control de vectores de interés en salud pública. Es importante resaltar que el reporte en cuanto al uso de los plaguicidas está relacionado con el tipo de actividades y control de plagas involucradas en cada uno de los departamentos.

Con respecto a los plaguicidas carbamatos, el uso descendió de modo considerable, pasando de 13,1 % en el 2013-2016 a 4,4 % en este periodo, donde los principales representantes fueron metomil, con el 32,4 %, y carbofurán, con el 42,6 %; disminuyó con relación a años anteriores, lo cual concuerda con datos reportados al Ministerio de Salud y Protección Social sobre los plaguicidas informados por grupo químico en el autodiagnóstico de las entidades territoriales. Así mismo, lo anterior puede ser explicado por lo que en nuestro país en la actualidad se vigila y se controla el comercio de este producto peligroso; esto, con base en decisiones fundamentadas sobre la importación y exportación de este tipo de productos químicos a fin de proteger la salud humana y el medio ambiente de posibles daños, y para contribuir al marco internacional que regula la gestión ecológica y racional de los compuestos químicos peligrosos durante su ciclo de vida. Así mismo, desde el 2009 se han venido revisando los registros de venta de plaguicidas de uso agrícola a base de carbofurán para uso en Colombia (Ministerio de Salud y Protección Social, 2022), (Cárdenas et al., 2019), (FAO y PNUMA, 2011), (ICA y Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2014).

En cuanto a los datos de compuestos organoclorados en el total informado cada año, durante este periodo disminuyó al igual que los carbamatos, dato que muestra descenso en el uso de sustancias potencialmente tóxicas y que concuerda con lo reportado en las últimas décadas. El mercado de los plaguicidas se ha alejado de los compuestos organoclorados a los compuestos organofosforados y de estos a los bioplaguicidas (bacterias, algas, protozoos, virus y hongos) y las feromonas. La transición es debida a cambios de regulaciones gubernamentales, acuerdos internacionales, innovación de productos y a las presiones del mercado (United Nations Environment Programme, 2019), (Cárdenas, O., 2012), (Cárdenas, O., 2015), (Cárdenas, O., 2019).

El grupo químico ácido fosfónico fue uno de los grupos con alto porcentaje de reporte en este estudio; el glifosato, como principal representante, se ha encontrado contaminando aguas superficiales y subterráneas. La EPA reportó que las exposiciones a residuos de glifosato en aguas de consumo humano, en varios países, estaban entre las primeras causas de incidentes de intoxicación en humanos. El herbicida glifosato y los insecticidas malatión y diazinón fueron clasificados por la Agencia Internacional de Investigación del Cáncer (IARC) como probablemente carcinogénico para humanos (Grupo 2A); y el insecticida paratión fue clasificado como posiblemente carcinogénico para humanos (Grupo 2B) (International Agency for Research on Cancer, World Health Organization, 2015). El glifosato es uno de los herbicidas de más alta producción global y su mayor uso a nivel mundial es en la agricultura; este uso ha aumentado de manera considerable desde el desarrollo de cultivos modificados genéticamente para hacerlos resistentes al glifosato. El glifosato también se utiliza en aplicaciones forestales, urbanas y domésticas. Se ha detectado glifosato en el aire durante la pulverización, en el agua y en alimentos. La población general está expuesta más que todo a través de la residencia en lugares cerca de las áreas rociadas, por uso en el hogar y por la dieta. En Colombia, el incremento en el uso puede explicarse por la aspersión con el herbicida para el control y la erradicación de cultivos ilícitos (UNODC, 2022).

Los organoclorados son muy persistentes en el medio ambiente y se biomagnifican en la cadena

alimenticia, dado que se almacenan en los tejidos adiposos con toxicidad aguda baja, pero con efectos crónicos conocidos. La mayor parte de los organoclorados que se encuentran en las muestras de suelo, sedimento y agua son depósitos residuales dejados hace décadas cuando el uso de estos plaguicidas era legal y generalizado (Weinberg, 2009). Es importante notar que el uso de plaguicidas organoclorados disminuyó de manera significativa con relación a los años anteriores, como era de esperarse, considerando que fueron prohibidos definitivamente por el Consejo de Estado desde el 2001, por los posibles efectos en la salud del hombre y el impacto al medio ambiente (Consejo de Estado, 2001). La producción y el uso de algunos se estos productos peligrosos se ha eliminado de forma gradual por la acción internacional, como en el caso de los bifenilos policlorados (PCB); o se han reducido de manera significativa, como el diclorodifeniltricloroetano (DDT); y, para competir con los plaguicidas organoclorados, los plaguicidas fluorados se están convirtiendo en un producto establecido en la agricultura moderna; la representación de los plaguicidas fluororgánicos en el mercado de agroquímicos ha aumentado en forma considerable, representando más de la mitad de los pesticidas aprobados entre 2010 y 2020 (Alexandrino et al., 2022).

Los piretroides tienen una persistencia muy baja en el ambiente y su toxicidad para los humanos es generalmente baja; estos compuestos tienden a ser menos usados que los organofosforados por los pequeños agricultores para el control de insectos debido a que son más caros y los insectos han desarrollado resistencia a ellos con más frecuencia que hacia los organofosforados. Los bipiridilos son herbicidas de amplio uso porque son muy solubles en agua; los más conocidos son gramoxone, gramafin y paraquat, y este último es el más reportado en el presente estudio. Los tiocarbamatos son, en su mayoría, fungicidas; tienen una toxicidad aguda de moderada a baja; sin embargo, se sospecha que algunos son carcinógenos. En el país se han mostrado grandes avances y ha dado un paso importante para minimizar el uso de plaguicidas potencialmente peligrosos y, por ende, para apoyar en la mitigación de los problemas causados por el uso inadecuado de plaguicidas de alta toxicidad (ICA y Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2014).

Las escalas potenciales del comercio ilegal de plaguicidas encuentran con facilidad mercados preparados, ante todo en países con economías en desarrollo y en transición, en gran parte debido a la falta generalizada de conocimientos sobre los riesgos asociados con el uso de plaguicidas falsificados y al bajo nivel de vida. La información sobre las marcas registradas no es particularmente fácil de usar y la información sobre los productos falsificados es casi nula. Así mismo, la comercialización de plaguicidas en línea es una tendencia global en desarrollo; el mercado en línea no regulado, a veces junto con la entrega anónima, complica la trazabilidad de diferentes tipos de plaguicidas ilegales disponibles. Una estimación de la cantidad de plaguicidas de calidad inferior vendida en los países en desarrollo era del 30 % en el 2005 (United States Environmental Protection Agency, 2018), (United Nations Environment Programme (UNEP) y GRID-Arendal, 2020).

El manejo de plagas por los pequeños agricultores se ve influenciado por la promoción que hacen de estos productos a través de diferentes medios como la radio, la visita de algunos agentes impulsadores, los comerciantes y los vecinos en las áreas potencialmente cultivables. A pesar de restricciones de muchos de los plaguicidas en algunos países, se observa alta frecuencia de reportes de intoxicaciones agudas y efectos en salud en la población consumidora de residuos de estos tóxicos de forma indirecta en alimentos, contaminación de fuentes de agua y efectos desconocidos no cuantificados sobre la fauna silvestre y los organismos benéficos en los ecosistemas agrícolas.

En Colombia existían 2822 plaguicidas con registro de venta, de los cuales había entre 5 a 40 marcas de elección comercial; de estos, 714 registros, es decir una cuarta parte del total, se encontraban en la lista de plaguicidas en vigilancia en el mundo. Como si la situación ya no fuera preocupante, cuando se analizaron los seis ingredientes activos más usados en el país (mancozeb, 2,4-D, glifosato, paraquat, clorpirifos e imidacloprid t/año), estos se consideraban que representaban una carga residual muy peligrosa para las personas y el ambiente. De los citados, mancozeb (con 112 productos formulados con este principio activo autorizados en el país) es consi-

derado probable carcinógeno humano por la EPA; también 2,4-D, con 83 productos formulados para el país, es considerado probable cancerígeno humano por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC); glifosato, con 80 productos formulados para el país, además de afectar a las abejas, es considerado probable cancerígeno humano por la IARC; el paraquat, con 27 productos formulados para el país, ha sido asociado con el incremento del riesgo de padecer la enfermedad de Parkinson, presenta una toxicidad 28 veces más aguda que el glifosato y no tiene antídoto; los compuestos como el imidacloprid, con 99 productos formulados en el país, son los principales responsables de la pérdida de colonias de abejas, ya que es 7000 veces más tóxico para estas que el DDT sobre la base de la dosis letal media (DL50); también está el clorpirifos, con 24 productos formulados, un insecticida que provoca daño neurológico en niños, lo que lleva a un menor coeficiente intelectual y problemas de atención; algunas pruebas también sugieren que este plaguicida puede interferir con el desarrollo neurológico (Henao y Gómez, 2021), (International Agency for Research on Cancer, World Health Organization, 2015).

De acuerdo con lo reportado en la literatura, el clorpirifos fue uno de los plaguicidas de mayor venta en los Estados Unidos y en todo el mundo, con alta frecuencia de uso en las actividades de agricultura en este estudio; es de amplio uso en cultivos de arroz. Se han detectado residuos en el aire, suelos y agua, incluida el agua lluvia en zonas urbanas y rurales, lo que genera un factor de riesgo potencial para el medio ambiente; considerado de alta toxicidad para animales como los peces y con probables efectos para la salud (Burke et al., 2017). En un estudio sobre residuos peligrosos generados en el manejo de cultivo, cosecha y poscosecha del banano se usan plaguicidas como organofosforados, ácido fosfónico y tiocarbamatos..., entre otros (Camargo et al., 2021).

En cuanto a los cultivos reportados en este estudio, al contemplar la distribución geográfica acorde con el mapa de zonificación hidrográfica de Colombia, las unidades de producción agropecuaria (UPA) localizadas en las áreas andinas y en algunas zonas de la región Caribe son una constante como pequeñas parcelas y complementos indispensables del sector agrícola en el país. En este aspecto, del total nacional de 2.085.423 UPA, la mayor participación correspondió a las UPA de los productores constituidos como personas naturales (93,8 %), y el 48,1 % de estos tenían áreas menores a tres hectáreas (DANE, 2020a).

Es así como el programa de vigilancia de plaguicidas —dejando de lado los productos agroindustrializados (monocultivos) principales del país y para el periodo analizado— listó gran variedad de cultivos transitorios y asociados en las UPA de productores; en general, esta producción fue realizada sobre todo por economías campesinas, cuya distribución geográfica mostró mayor concentración de cultivos en los departamentos de Caldas, Antioquia y Boyacá, con un 62,2 %, reporte mayor a los otros siete departamentos relacionados durante el periodo de estudio.

Durante el periodo de análisis, según los municipios con reporte de uso de plaguicidas en Colombia de 2017-2021, y acorde con las cinco macrocuencas según la zona donde desembocan los ríos principales del país; se puede determinar el reporte de uso de plaguicidas. Se acentúa la mayor parte en la zona central o parte media del altiplano de la cuenca Magdalena-Cauca, seguidos del borde suroccidental de las cuencas Pacífico y Amazonas; y, en menor extensión, las cuencas Caribe y Orinoco, siendo relevantes los departamentos y municipios con características de relieve de partes altas, medias bajas que captan agua y sedimentos de los tributarios de diferente orden, tales como nacimientos de agua, arroyos, quebradas y ríos, hasta desembocar en los ríos principales del país que dan origen a las cuencas mencionadas (García y Vargas, 2013).

Con base en la categorización de la producción por grupos de cultivos en el país —excluyendo los cultivos agroindustriales, referenciados por ENA-DANE, 2019—, el documento listó en cultivos transitorios y asociados los tubérculos y plátano con un 10,8 %; seguidos por los frutales con 9,5 %; hortalizas, verduras y legumbres con 5,4 %, y las otras áreas cultivadas con 1,1 % (DANE, 2020). Con relación a grupos de cultivos reportados en este estudio, se registró un 55,6 % (20.733) para el grupo de hortalizas, verduras y legumbres, seguido por frutales con el 34,3 % (12.780), tubérculos y plátano con el 4,4 %

(1636); el 3,4 % (1269) de cereales y, finalmente, el grupo de árboles, flores y dispersos con el 2,3 % (850) de representatividad.

## 8.6 Consideraciones sobre calidad de agua y uso de plaguicidas en Colombia

En esta sección se presentan las consideraciones de la evaluación del estado calidad del agua y de la presión por vertimientos a las fuentes hídricas superficiales al igual que las consideraciones sobre la frecuencia y uso de plaguicidas en Colombia.

### Condiciones de la calidad del agua y presiones por vertimiento

La unión de esfuerzos para el diseño y la construcción de los programas de monitoreo del agua, el fortalecimiento de capacidades, y el monitoreo nacional, regional y local son necesarios para el mejoramiento de la evaluación de las condiciones de la calidad del agua, lo cual permite dar el soporte científico a la generación de conocimiento y a la toma de decisiones. Por tanto, es necesario continuar con la formulación e implementación de los programas institucionales regionales de monitoreo integral del agua (Pirma) que aporten a la evaluación regional y nacional del agua.

Los resultados de las cargas generadas para población, sacrificio y beneficio de café indican una predominancia del parámetro DQO y en segundo lugar los SST. Estos resultados muestran la necesidad de enfatizar en que los sistemas de tratamiento de aguas residuales se enfoquen en mejorar sus procesos para la reducción de carga para dichos parámetros. En el caso de la DBO, aunque no es el más representativo en los resultados obtenidos, en la medida que se mejoren los procesos para aumentar la remoción de DQO, directamente se aumenta la remoción de la DBO.

En términos de información, es importante disponer de inventarios actualizados y verificados de los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas, urbanas y rurales, y de las plantas de beneficio animal, coberturas o caudales de aguas residuales tratadas y sus respectivos porcentajes de remoción de carga; esto para que la estimación de las cargas contaminantes vertidas estén lo más cercano a la realidad del territorio.

En futuros estudios nacionales del agua, es importante continuar el trabajo articulado con entidades como la Federación Nacional de Cafeteros para determinar con mayor precisión el volumen de vertimientos que previamente son tratados mediante algún sistema y de esta manera cuantificar la carga removida antes de ser vertida en las fuentes hídricas. Otro aspecto para considerar es determinar el potencial impacto que las aguas residuales vertidas en suelo pueden tener sobre las fuentes hídricas.

En cuanto a la información del uso de agroquímicos, es fundamental generar estadísticas a nivel municipal; de esta manera se puede analizar la incidencia del uso de estas sustancias en la calidad de las fuentes hídricas. Además, se deben fomentar investigaciones que determinen el porcentaje de agroquímicos que por escorrentía superficial directa pueden llegar a una fuente hídrica (contaminación difusa) y cómo determinadas variables pueden aumentar dichos aportes, por ejemplo, la precipitación.

### Uso de plaguicidas en Colombia

A través del análisis se ha venido mostrando, de forma general, la frecuencia de uso de plaguicidas por departamento, información de gran importancia en salud pública. Es relevante destacar que se siguen usando plaguicidas de categoría toxicológica considerable; entre estos, los de categoría muy peligrosa con representantes como los organofosforados, los cuales siguen siendo los compuestos químicos más usados en el país en actividades agrícolas, pecuarias y sanitarias, de acuerdo con lo reportado en la literatura.

Se registra que el mayor reporte de uso de plaguicidas lo hacen los departamentos que informan el uso tanto en el control de vectores en salud pública como en el sector agrícola de sus municipios; sin embargo, esto no necesariamente quiere decir que tienen más uso de estos compuestos tóxicos, sino que tienen mayor cobertura y reporte.

En cuanto a toxicidad, el mayor uso correspondió a la categoría de moderadamente peligrosa (II) con el 57,1 %, seguido por la de ligeramente peligrosa (III) con 23,5 %, según la clasificación toxicológica establecida por la Organización Mundial de la Salud. Es importante resaltar que hubo una notable disminución en el uso de plaguicidas de la categoría sumamente peligrosa (Ia) con el 0,3 % y muy peligrosa (Ib) con el 5,6 % con relación a años anteriores 1,1 % y 21,0 %, respectivamente.

Los plaguicidas para la salud pública no están cubiertos por la legislación sobre plaguicidas en el 40 % de los países, lo que indica que la reglamentación en muchos es claramente inadecuada. De acuerdo con el Código de Conducta, la legislación sobre plaguicidas debe abarcar todos los tipos de estos compuestos químicos para todos los sectores en los que se van a emplear.

En 2018, en la encuesta mundial sobre la situación actual de manejo de plagas en la agricultura y salud pública, la OMS y la FAO recomendaron a 194 países en vía de desarrollo (incluida Colombia) revisar su marco jurídico para la gestión de plaguicidas, establecer colaboración (sub)regional, proteger y vigilar la salud de los aplicadores de plaguicidas, y proporcionar capacitación a los agricultores sobre la aplicación de la gestión integrada de plagas y el uso del equipo de protección personal.

El uso de plaguicidas afecta a los individuos de la comunidad que habitan o laboran en el área de influencia de estos tóxicos y se convierte en un problema de salud pública creciente que tiene alto costo social, económico y ambiental; esto exige una vigilancia intersectorial articulada y oportuna, en particular de los países en desarrollo, donde el trabajo agrícola es una de las labores predominantes. Un modelo de desarrollo sostenible requiere más atención a los riesgos laborales en la agricultura.

La información aporta datos importantes sobre las características y condiciones de la población con riesgo de exposición a plaguicidas en las diferentes actividades agrícolas asociadas a cultivos asociados y transitorios en diferentes zonas del país; y contribuye al desarrollo de actividades en el cambio de conductas respecto al manejo responsable de plaguicidas para minimizar los posibles casos de intoxicación y contaminación en cada uno de los municipios y departamentos.

Es fundamental el apoyo de las entidades territoriales de salud, con el fin de contar con información permanente que contribuya a la formulación de políticas y acciones de inspección, vigilancia y control. Es importante que las estrategias nacionales involucren el trabajo participativo de las comunidades y líderes comunitarios para desarrollar el control de riesgos con enfoques actualizados en salud ambiental, con acciones de promoción y prevención, e implementar capacitaciones y campañas educativas en la población en riesgo en cada entidad territorial.

Una de las principales limitaciones del estudio involucra el sesgo de memoria por la forma de recolección de la información basada en el autorreporte de los participantes por medio de un formulario de encuesta aplicado a través de una entrevista. Durante la pandemia de la COVID-19 se presentó disminución en la continuidad y oportunidad en el reporte de la información por parte de las entidades territoriales de salud. De igual manera, los datos de algunas entidades fueron bajos debido a que solo realizan la vigilancia por laboratorio a los aplicadores de plaguicidas en salud pública para el control de vectores durante brotes o porque se presentó un brote de intoxicación. Estas limitantes pueden influir en la consolidación de la información, ya que al no contar con el reporte de información de manera continua, no es posible tener el panorama nacional del uso de plaguicidas; de esa forma, los resultados obtenidos solo permitieron contar con información general sobre los tipos de plaguicidas empleados en doce departamentos del país.



**Foto por:**
Deicy Urrego Benítez
Rio Claro

CAPÍTULO 9

# SUSCEPTIBILIDAD AL DESABASTECIMIENTO HÍDRICO EN MUNICIPIOS

**Autores:**

**IDEAM:**
Jenny Paola Marín Salazar
Juan Gabriel Osorio Osuna

Con la colaboración de:
Julián Albeiro García Gómez
Pasante de la Universidad Nacional de Colombia

# Capítulo 9. Susceptibilidad al desabastecimiento hídrico en municipios

En el marco del Estudio Nacional del Agua, se ha venido avanzando en la identificación de municipios susceptibles al desabastecimiento en época seca a partir de la consolidación de insumos que son consultados en diferentes fuentes nacionales y algunas consideraciones metodológicas para su desarrollo. Para la versión del ENA 2022, se incluye además el análisis de las afectaciones a nivel municipal en sus sistemas de abastecimiento por la ocurrencia de eventos que son producto de la temporada de lluvia. Adicionalmente, para ambas temporadas se muestra el consolidado de emergencias que se han tenido a escala municipal para el periodo histórico 1998-2021 y que, de hecho, han ocasionado una afectación en la prestación del servicio de acueducto.

Este componente permite a los tomadores de decisiones implementar acciones preventivas frente al desabastecimiento hídrico asociado, en especial, con la ocurrencia de eventos hidroclimatológicos que traen consigo afectaciones. Entre estas se destacan: la reducción de los niveles de las fuentes abastecedoras de los acueductos municipales a causa de la temporada seca; o la afectación tanto en las fuentes hídricas de abastecimiento como en la infraestructura de los sistemas de acueducto, producto de la ocurrencia de eventos originados por la lluvia (como crecientes súbitas, avenidas torrenciales, inundaciones, movimientos en masa, vendavales, tormentas eléctricas y avalanchas, entre otros) que terminan en una insuficiencia de agua para satisfacer la demanda en el sector doméstico. En este sentido, y con el propósito de fortalecer el análisis presentado en el ENA 2018, en esta versión 2022 se realiza una evaluación del nivel de recurrencia de dichas afectaciones para el periodo 2017-2021 y el tipo de área (urbana, rural o mixta) que ha presentado problemas de desabastecimiento a la población, y se identifican cuáles municipios requieren especial atención y definición de estrategias integrales para su gestión.

Así mismo, como complemento a lo presentado en la versión anterior del ENA, se hace la delimitación de cuencas abastecedoras de acueductos para 69 municipios de Colombia, de manera que se cuente con información para realizar análisis en una escala de trabajo más detallada, tomando como referencia aquellos acueductos que abastecen más de 5000 suscriptores entre población rural y urbana. Para estas cuencas abastecedoras delimitadas se estiman indicadores a nivel de dichas cuencas o sistemas hídricos de algunos de los componentes del estudio.

## 9.1 Enfoque conceptual y metodológico

La estructura conceptual y metodológica de este componente del ENA 2022 se sustenta en los análisis presentados en versiones anteriores del Estudio Nacional del Agua (2014, 2018), y se entregan nuevos aportes que contribuyen a mejorar los resultados obtenidos y reducir algunas incertidumbres que se han presentado en temas específicos, como la delimitación de áreas aferentes a las capta ciones de los acueductos municipales.

El *desabastecimiento hídrico* se entiende como la falta de agua, o bajos niveles en el suministro de agua, en un momento y lugar determinados; esto como resultado de recursos hídricos insuficientes, ausencia de infraestructura, un inadecuado mantenimiento de estas, o debido a bajos niveles del agua como consecuencia de diferencias estacionales o anuales en el clima, o por muchos otros factores hidrológicos e hidrogeológicos (FAO, 2013). En particular en el marco del ENA 2022, el *desabastecimiento hídrico* se asocia con las afectaciones en la prestación del servicio de acueducto en los municipios del país a causa de la ocurrencia de eventos relacionados con temporada seca o temporada de lluvia; en este último caso, se encuentran las crecientes súbitas, avenidas torrenciales, inundaciones, movimientos en masa, vendavales, tormentas eléctricas y avalanchas, entre otros, que ocasionan afectaciones, bien sea en la fuente hídrica que abastece el acueducto o en la infraestructura del sistema de abastecimiento, dificultando la captación del agua y, por tanto, la prestación del servicio para la población urbana o rural del municipio.

El análisis de municipios susceptibles al desabastecimiento permite identificar cómo los procesos naturales, las actividades humanas y la variabilidad o el cambio climático inciden en la dinámica del agua del país; particularmente, se centra en la evaluación de las afectaciones en la disponibilidad del recurso hídrico para abastecimiento a causa de temporadas secas y temporadas de lluvia. En este sentido, el tema de desabastecimiento hídrico en el ENA 2022 está dividido en dos componentes principales, así:

### 9.1.1 Listado de municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada seca y temporada de lluvia

Se identifican los municipios del país que han presentado afectación en la prestación del servicio de acueducto por temporada seca y temporada de lluvia. Esta selección no corresponde a un monitoreo sistemático de las fuentes hídricas de abastecimiento, sino a un análisis indicativo en función de bases de datos e información de entidades encargadas del seguimiento y reporte de eventos, y declaratorias de emergencia en diferentes zonas del país (Ideam, 2019), cuya consulta se realizó a través de solicitudes de información, por búsqueda propia en medios de comunicación y difusión de entidades públicas o a través de trabajo conjunto con el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. La Figura 256 muestra el procedimiento metodológico para la actualización del listado de municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada seca y temporada de lluvia.

### 9.1.2 Delimitación de cuencas abastecedoras de acueductos municipales

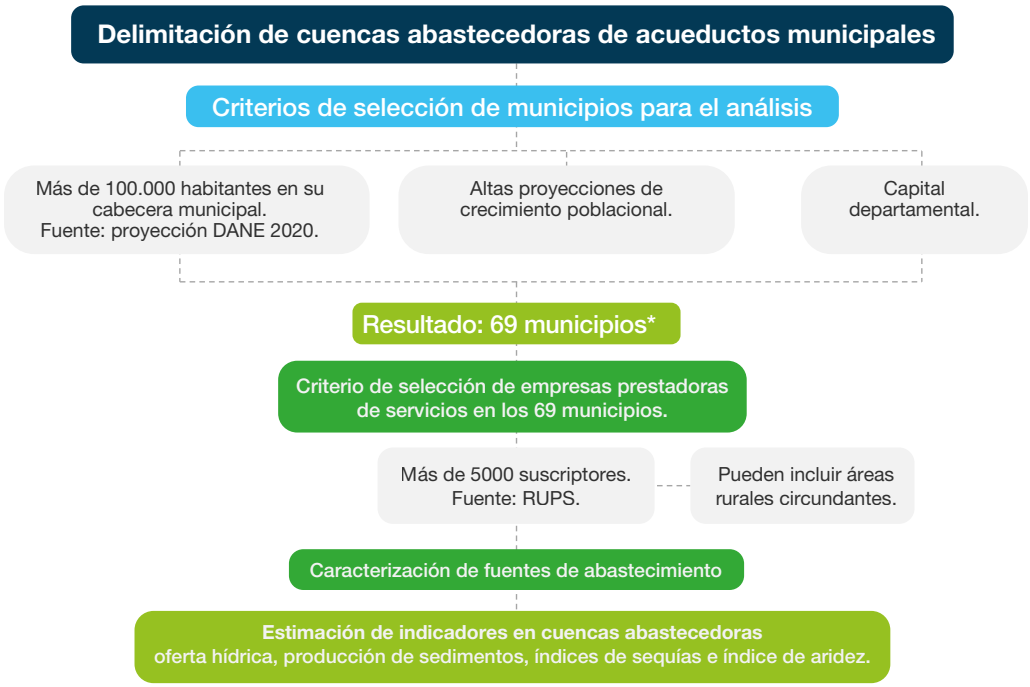
En este ítem se presenta la metodología para delimitar las cuencas aferentes a los puntos de captación de los acueductos principales que abastecen 69 municipios, los cuales fueron seleccionados en función del cumplimiento de al menos uno de los siguientes criterios: (1) cuentan con más de 100.000 habitantes en su cabecera municipal (según proyecciones de población del DANE al año 2020); (2) tienen altas proyecciones de crecimiento poblacional; y (3) son capitales departamentales.

Para la delimitación de las cuencas abastecedoras se realizó la búsqueda en el Registro Único de Prestadores de Servicio (RUPS) de las empresas prestadoras de servicio de acueducto que abastecen los 69 municipios; se realizó el filtro de aquellas empresas que cuentan con una cobertura de más de 5000 suscriptores y, por tanto, pueden considerarse «grandes prestadores de servicio» dentro de los municipios. Es importante resaltar que dichos prestadores pueden abastecer áreas rurales circundantes, por lo que el análisis en algunos casos abarca tanto el área urbana como rural. Así mismo, se realizó la caracterización para estas fuentes de abastecimiento, bien fueran superficiales o subterráneas, a partir de informaciones como: tipo y nombre de la fuente de abastecimiento, georreferenciación, tipo de captación, fuente alterna de abastecimiento, número de suscriptores y tipo de población que abastece (urbana, rural o mixta).

Además, en las cuencas abastecedoras se hizo la estimación de algunos indicadores del sistema hídrico natural e intervención antrópica, tales como: oferta hídrica, rendimiento de sedimentos, índices de sequías e índice de aridez. El esquema metodológico para este componente se sintetiza en la Figura 257, el cual aplica en su mayoría para fuentes de abastecimiento superficial; en el caso de fuentes subterráneas, se muestra la caracterización cualitativa del sistema de abastecimiento, dadas las limitaciones metodológicas para la estimación de los indicadores en estas.




Figura 256. Esquema metodológico para la actualización del listado de municipios susceptibles al desabastecimiento.




**En los municipios que cuentan con fuentes de abastecimiento subterráneas, sólo se realiza la caracterización cualitativa de dichas fuentes.*

Figura 257. Esquema metodológico para la delimitación y caracterización de cuencas abastecedoras y estimación de indicadores hídricos en dichas unidades de análisis.

## 9.2 Susceptibilidad al desabastecimiento en temporadas seca y de lluvia

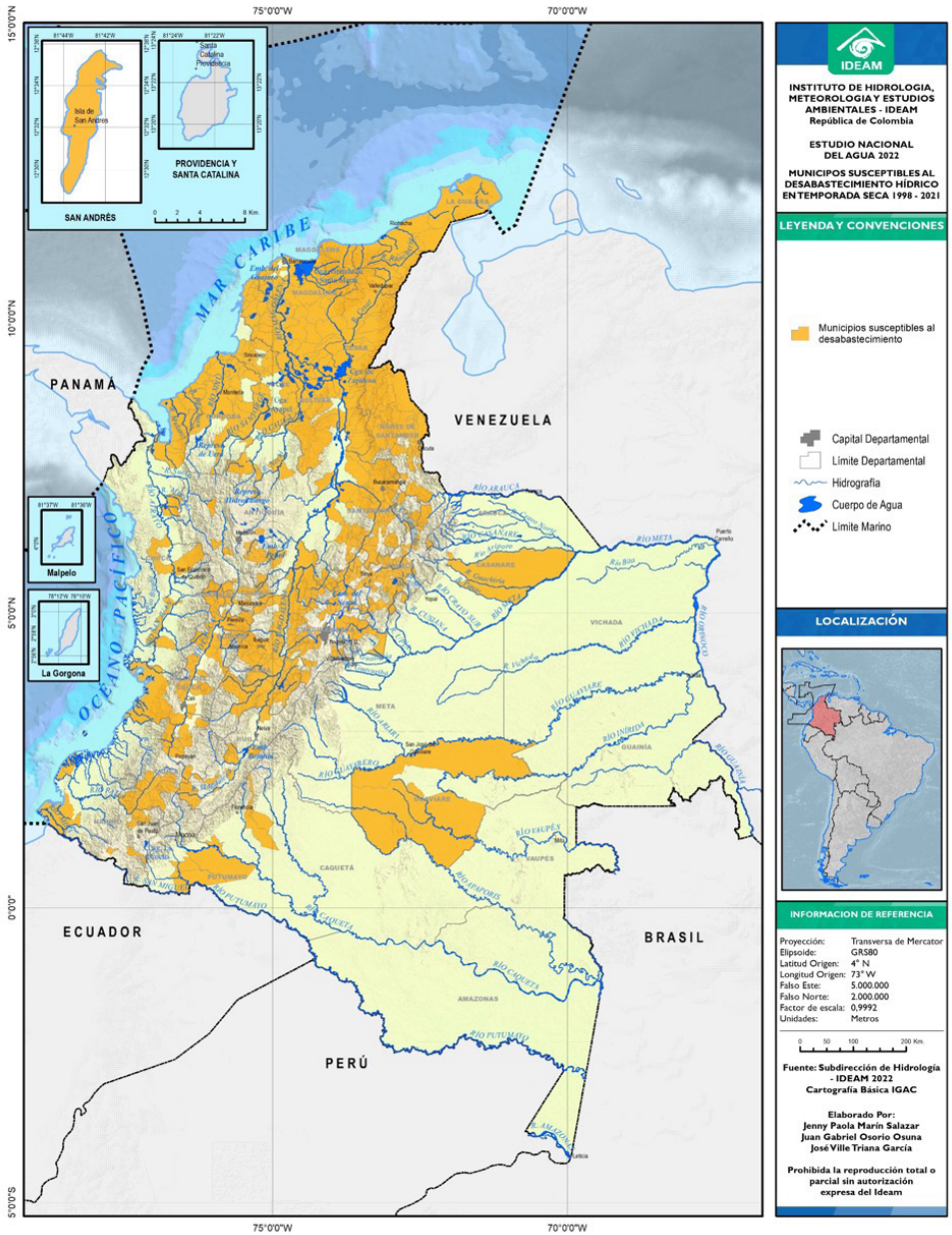
A continuación, se muestran los resultados obtenidos del análisis de municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada seca y temporada de lluvia, teniendo en cuenta la metodología presentada en el numeral 9.1. Se incluye el análisis de los periodos 1998-2021 y 2017-2021, y se resalta la distribución de las afectaciones en ambas temporadas a nivel municipal, su recurrencia y área de afectación. De la misma manera, se presentan los resultados de la evaluación de los indicadores relacionados con sequía y potencialidad de uso de aguas subterráneas para municipios susceptibles al desabastecimiento hídrico por temporada seca y erosión hídrica potencial, en el caso de los municipios susceptibles al desabastecimiento por temporada de lluvia.

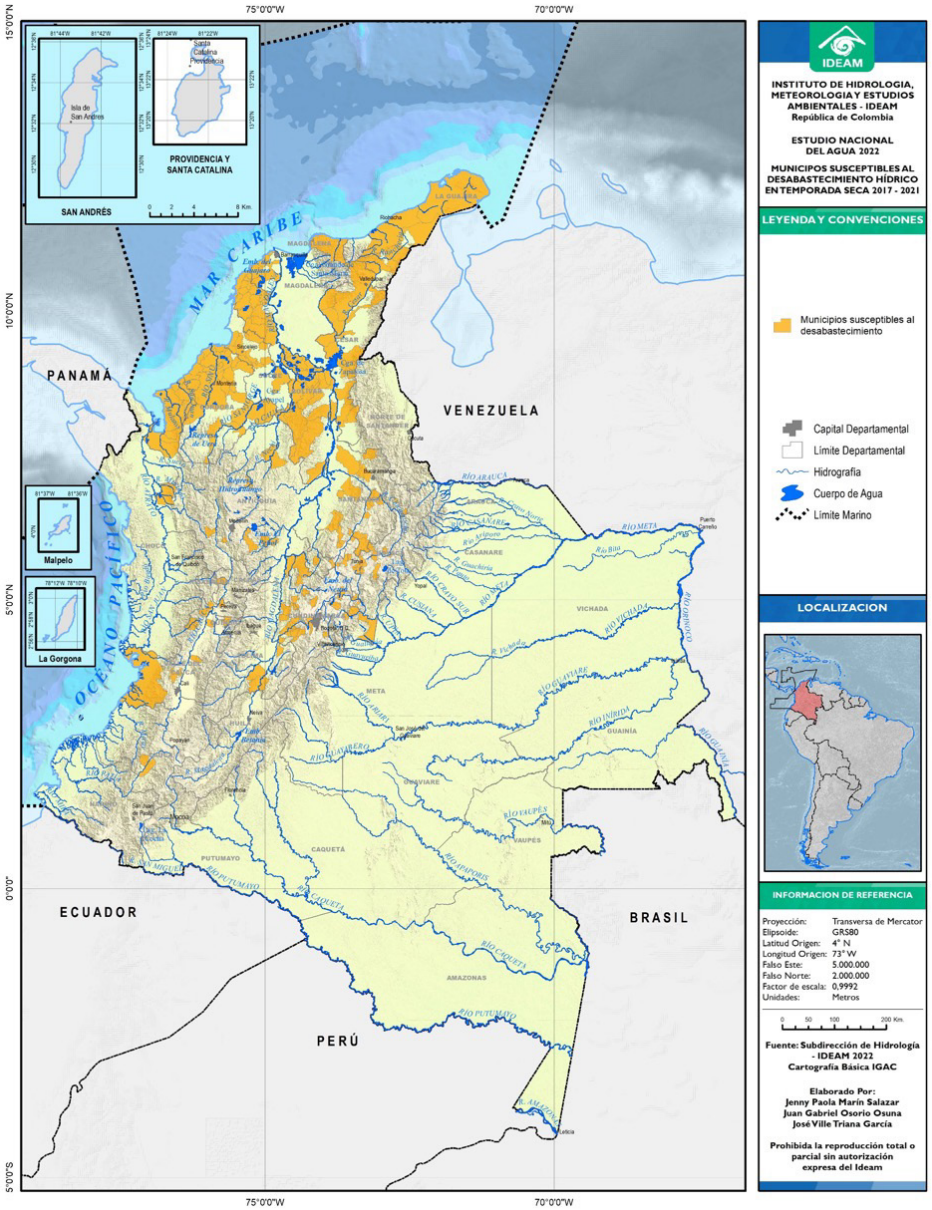
### 9.2.1 Municipios susceptibles al desabastecimiento por temporada seca

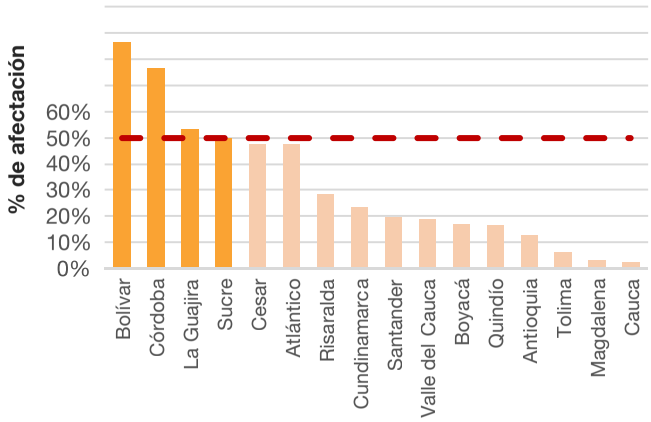
Con base en la información disponible para el periodo 1998-2021, se cuenta con un listado de 565 municipios que han presentado afectaciones (al menos en una ocasión) en la prestación del servicio de acueducto a causa de temporadas secas. La metodología para el ENA 2022 incluye la recopilación de nueva información que permite identificar la temporalidad y, de esta manera, tener una «línea base» para el seguimiento de las afectaciones que se presentan a escala municipal. Es importante resaltar que, debido a los cambios metodológicos, los resultados obtenidos en los diferentes ENA no son comparables. La Figura 258 muestra la distribución en el territorio nacional de los 565 municipios que, a través del tiempo, han presentado contingencias en la prestación del servicio de acueducto por la ocurrencia de periodos secos.

En la evaluación de la afectación departamental (que se incluye en la Figura 258), se tienen en cuenta dos tipos de análisis. El primero de ellos considera el porcentaje de afectación departamental, tomando como referencia la relación entre el número de municipios afectados por departamento frente al total municipal de cada uno de ellos; esto arroja como resultado que departamentos como Magdalena, Cesar, La Guajira, Risaralda, Bolívar, Sucre, Córdoba, Guaviare, Tolima, Atlántico, Norte de Santander, Santander, Valle del Cauca, Quindío, Boyacá, y el departamento de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, han sido históricamente los territorios más susceptibles, con una afectación en al menos el 50 % de sus municipios. Por otro lado, el segundo análisis se centra en evaluar la distribución de los 565 municipios identificados en los 26 departamentos afectados, lo cual permite concluir que Boyacá, Cundinamarca, Santander, Bolívar y Tolima concentran la mayor cantidad de municipios susceptibles al desabastecimiento hídrico en temporada seca.

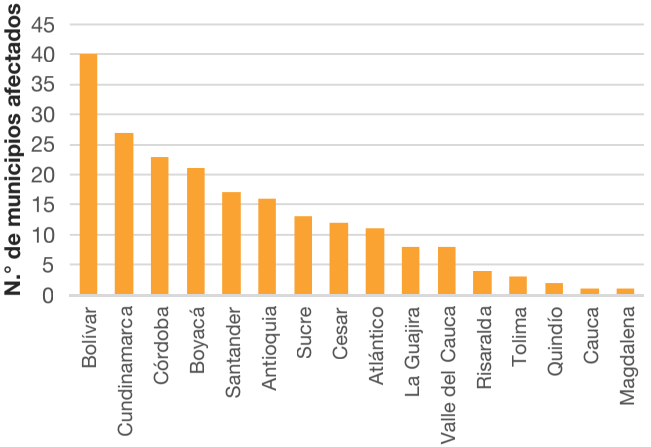
Además de esto, para el periodo 2017-2021 se han identificado afectaciones en 207 municipios en el territorio nacional, los cuales están distribuidos en dieciséis departamentos. La Figura 259 representa los resultados obtenidos para este grupo de municipios teniendo en cuenta los dos tipos de análisis descritos con anterioridad. En el primero de los casos, se evidencia que departamentos como Bolívar, Cundinamarca, Córdoba, Boyacá y Santander tienen la mayor participación respecto al total de municipios afectados. Por otro lado, Bolivar, Córdoba, La Guajira y Sucre han tenido afectaciones en la prestación de servicio de acueducto en al menos el 50 % de sus municipios para el periodo 2017-2021.


75°0'0"W
70°0'0"W
15°0'0"N
10°0'0"N
5°0'0"N
0°0'0"
5°0'0"S
MAR CARIBE
OCÉANO PACÍFICO
PANAMÁ
VENEZUELA
ECUADOR
BRASIL
PERÚ
SAN ANDRÉS
PROVIDENCIA Y SANTA CATALINA
Isla de San Andrés
Santa Catalina
Providencia
Malpelo
La Gorgona
Río Meta
Río Guaviare
Río Inírida
Río Vichada
Río Vaupés
Río Caquetá
Río Putumayo
Río Amazonas
Río Orinoco
Río Arauca
Río Casanare
Río Bita
Río Tomo
Río Tuparro
Río Negro
Río Apaporis
Río Yavarí
Río Mirití-Paraná
Río Cuiarí
Río Papurí
Río Tiquié
Río Uaupés
Río Içana
Río Xié
Río Guainía
Río Atabapo
Río Ventuari
Río Cuao
Río Sipapo
Río Manapiare
Río Parguaza
Río Suapure
Río Caura
Río Aro
Río Paragua
Río Caroní
Río Icabarú
Río Caratal
Río Yuruaní
Río Cuyuní
Río Mazaruni
Río Puruni
Río Barima
Río Amacuro
Río Grande de la Magdalena
Río Cauca
Río Sinú
Río Atrato
Río San Juan
Río Baudó
Río Patía
Río Mira
Río Mataje
Río Güepí
Río Putumayo
Río Caquetá
Río Amazonas
Río Yaguas
Río Loreto-Yacu
Río Igara-Paraná
Río Cotuhé
Río Puré
Río Apaporis
Río Vaupés
Río Guainía
Río Negro
Río Inírida
Río Guaviare
Río Meta




Afectación a nivel departamental, tomando como referencia el número de municipios susceptibles al desabastecimiento con relación al total de municipios de cada departamento.




Afectación a nivel departamental, tomando como referencia el número de municipios susceptibles al desabastecimiento de cada departamento con relación al total de municipios identificados en el ENA 2022.

Figura 259. Distribución de los 207 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada seca. Periodo 2017-2021.

Se resalta que, para el periodo 2017-2021, se han visto afectadas siete capitales departamentales: Cartagena de Indias, Tunja, Valledupar, Montería, Riohacha, Santa Marta y Sincelejo.

Para los 207 municipios susceptibles al desabastecimiento por temporada seca se realizó el análisis de recurrencia y área de afectación (urbana, rural o mixta). En el primero de los casos, se tiene que el 5 % evidencia una recurrencia alta, lo cual significa que se ha afectado en más de dos años para el periodo 2017-2021; el 19 % presenta una recurrencia media, y el 76 % solo ha tenido afectación en uno de los cinco años; por tanto, se considera en categoría baja. Se resalta que las mayores recurrencias se tienen en los departamentos de Bolívar, Cesar, Córdoba y Santander.

La Figura 260 consolida los resultados y muestra la distribución de la recurrencia en cada uno de los dieciséis departamentos que presentan municipios susceptibles al desabastecimiento por temporada seca.

Así mismo, con relación al área de afectación, el 63 % de los 207 municipios han presentado problemas de desabastecimiento en su área urbana y rural (mixta), el 21 % únicamente en la urbana y el 16 % restante en la zona rural. Esta información corresponde a un análisis indicativo en función de la información reportada en los consolidados anuales de emergencias de la UNGRD, los medios de comunicación y los informes de seguimiento al fenómeno de El Niño del 2019 realizados por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. La Figura 261 muestra los resultados obtenidos y la distribución por departamento de las áreas con afectación por desabastecimiento en los 207 municipios susceptibles por temporada seca.

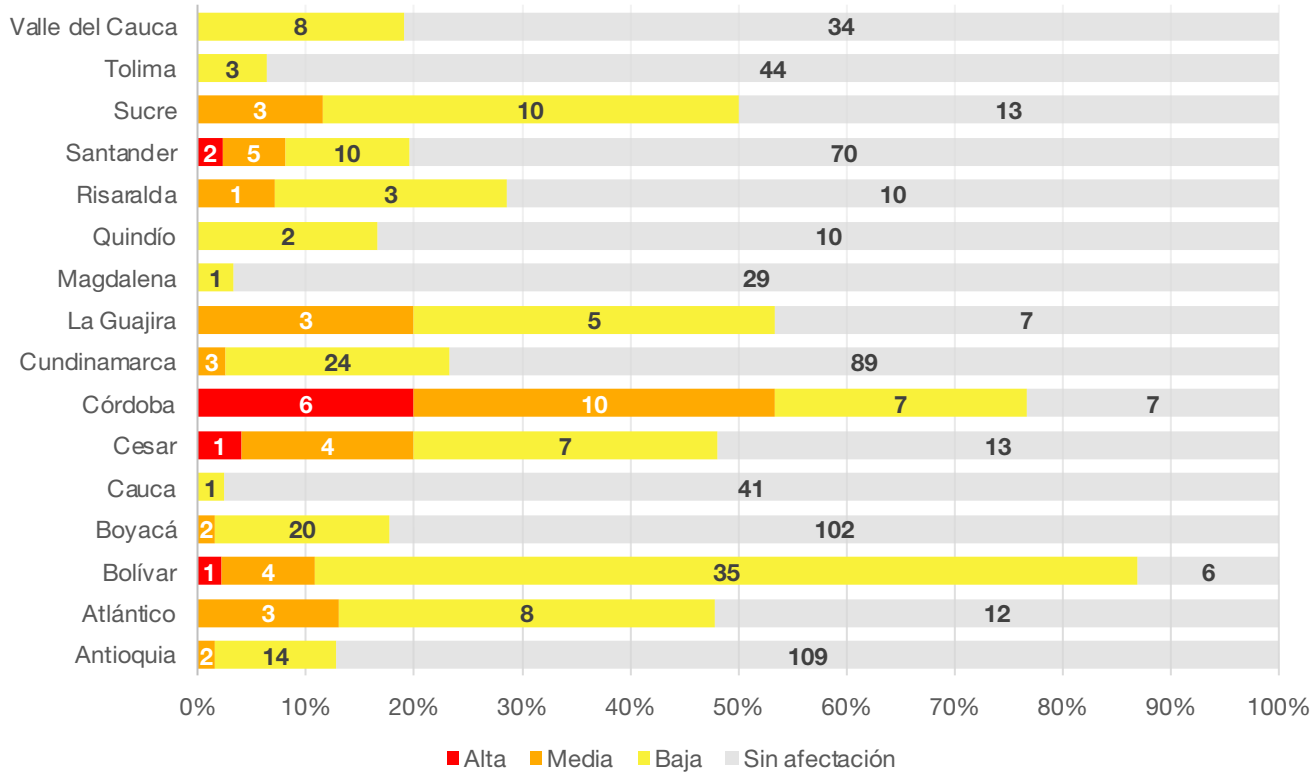



Figura 260. Distribución a nivel departamental de la recurrencia de las afectaciones en los 207 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada seca. Periodo 2017-2021.

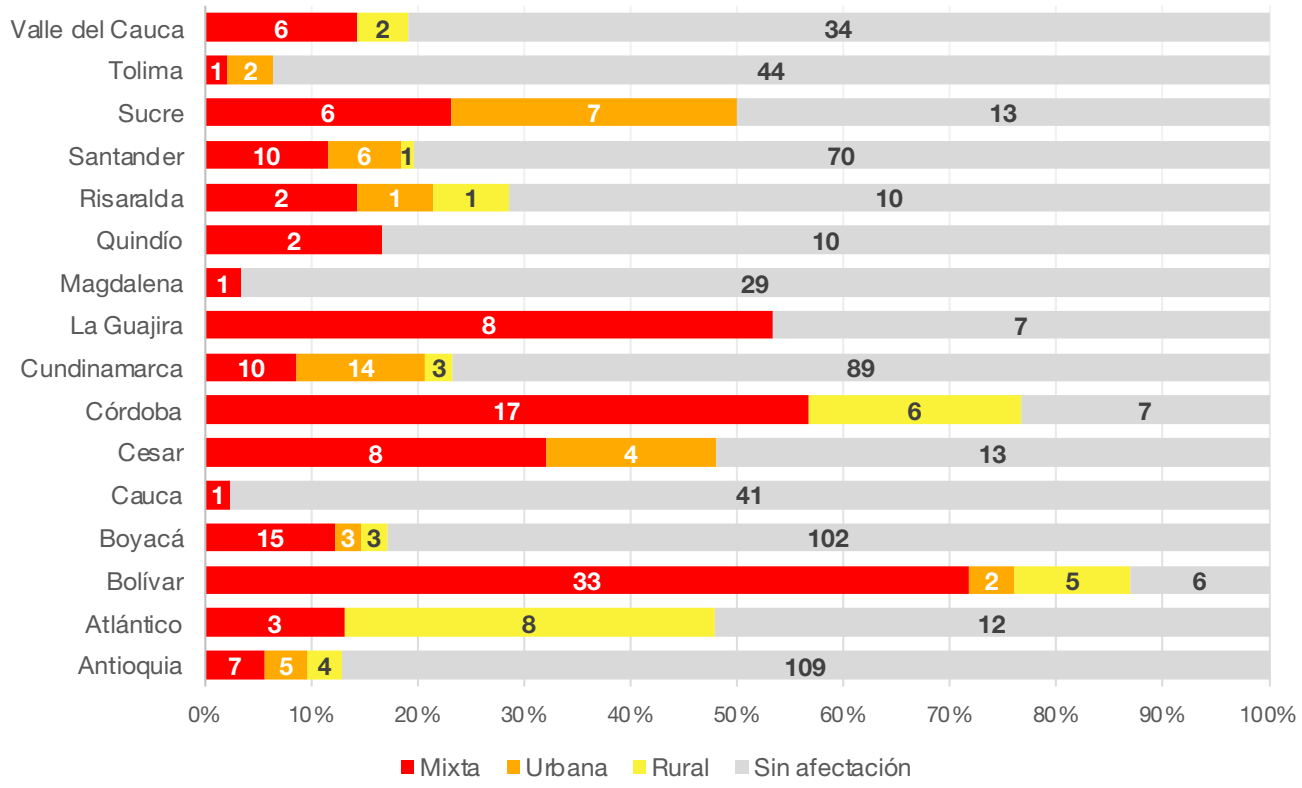



Figura 261. Distribución a nivel departamental del área que ha presentado afectaciones en los 207 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada seca. Periodo 2017-2021.

Igualmente, se realizó la evaluación de los impactos de la sequía en los 207 municipios susceptibles al desabastecimiento por temporada seca, tomando como referencia los resultados del índice multivariado de precipitación, humedad del suelo y escorrentía (MSDIPreSmoEsc), con el propósito de identificar el grado de correspondencia entre la ocurrencia de eventos de sequía y la afectación por desabastecimiento en estos territorios. Para ello, se seleccionó el indicador que representa la mayor duración en meses y la mayor magnitud. Este último se divide por la duración, y se obtienen de esta manera seis niveles de categorización que están dentro de los rangos *Normal* (0,5 a -0,5), *Anormalmente seco* (-0,5 a -0,8), *Sequía moderada* (-0,8 a -1,3), *Sequía severa* (-1,3 a -1,6), *Sequía extrema* (-1,6 a -2) y *Sequía excepcional* (-2). Así mismo, se realiza el conteo del número de eventos que se presentaron por municipio para el periodo comprendido entre 2017 y 2020. El año 2021 no fue analizado en el componente de sequías.

Los resultados consolidados en la Figura 262 permiten concluir que el 79 % de los 207 municipios han presentado sequías en los años reportados con situaciones de desabastecimiento, mientras que el 21 % restante no registraron eventos asociados en la metodología de los índices de sequía o se encuentran dentro de la categoría Normal.

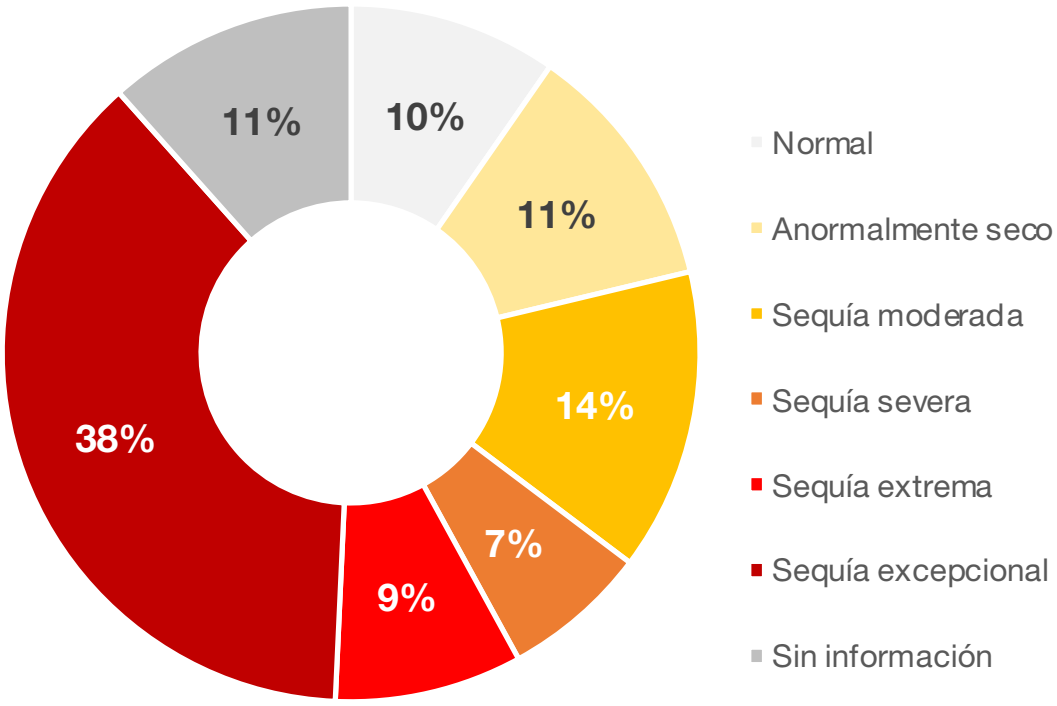



Figura 262. Distribución de los resultados del índice de sequía (MSDIPreSmoEsc) en los 207 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada seca.

Además de esto, en este capítulo se realiza un análisis de las alternativas de uso de fuentes subterráneas para abastecimiento en los 207 municipios susceptibles al desabastecimiento por temporada seca para el periodo 2017-2021. Tomando como referencia los avances descritos en el ENA 2018 (Ideam, 2019), se identificaron aquellos municipios que cuentan con suficiente información y conocimiento hidrogeológico para sugerir que pueden realizar el aprovechamiento del agua subterránea para su abastecimiento. A dichos municipios se les asignó una categorización de potencialidad de uso conjunto de agua superficial y agua subterránea (alta, media, baja), de acuerdo con el estado del conocimiento hidrogeológico (muy alto, alto, medio, bajo o muy bajo) de los sistemas acuíferos donde estos se encuentran.

El resultado de este análisis permitió concluir que el 34 % de los 207 municipios susceptibles cuentan con un alto potencial de uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas. Se resaltan los municipios de departamentos como Cauca, La Guajira y Quindío, en donde el 100 % de los municipios susceptibles localizados en ellos cuentan con un alto potencial de aprovechamiento de aguas subterráneas. Por otro lado, el 35 % tienen un nivel de conocimiento medio, lo cual implica que pueden aprovechar el recurso subterráneo siempre y cuando se fortalezca su campo de conocimiento; y, finalmente, el 31 % corresponde a la categoría *baja*, lo cual indica que la información es escasa e insuficiente; por tanto, su aprovechamiento no es viable. La Figura 263 consolida los resultados obtenidos a nivel departamental.

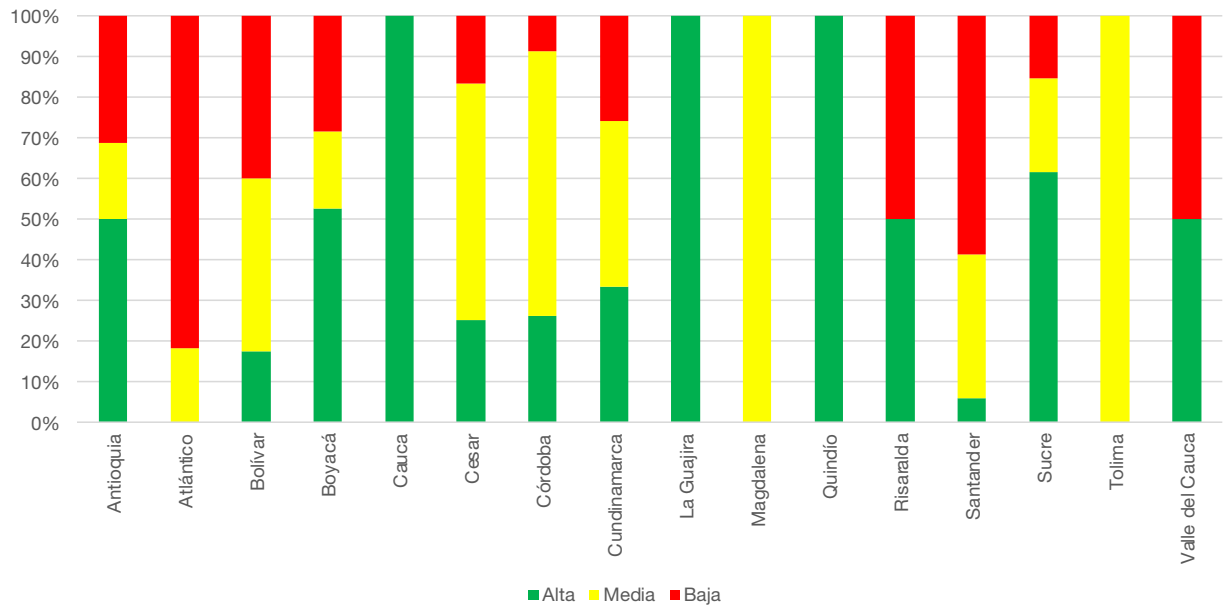



Figura 263. Potencialidad de uso de aguas subterráneas en los municipios susceptibles a desabastecimiento por temporada seca de dieciséis departamentos.

Por último, tomando como referencia la zonificación hidrográfica del Ideam (Ideam, 2013), la Figura 264 representa la distribución por área hidrográfica de los 207 municipios susceptibles al desabastecimiento por temporada seca, evidenciando que el 91 % de ellos se concentran en las áreas hidrográficas Magdalena-Cauca y Caribe.

Respecto al análisis por zona hidrográfica (Figura 265), la mayor cantidad de municipios susceptibles al desabastecimiento por temporada seca se localizan en Bajo Magdalena, Caribe litoral, Sogamoso, Medio Magdalena y Bajo Magdalena - Cauca - San Jorge, que lideran las cinco primeras posiciones en el análisis presentado.

De manera particular se resalta que, dado que los municipios pueden pertenecer a diferentes unidades de la zonificación hidrográfica, los datos en estos niveles pueden diferir.

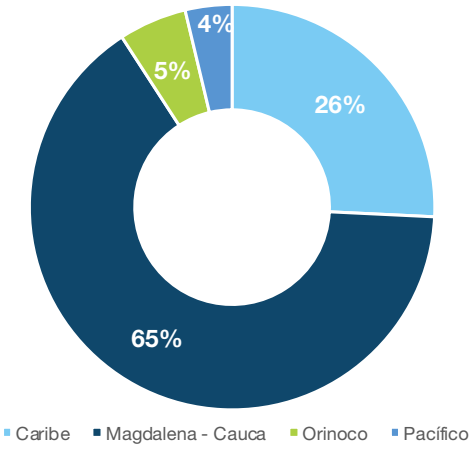



Figura 264. Distribución por área hidrográfica de los 207 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada seca.

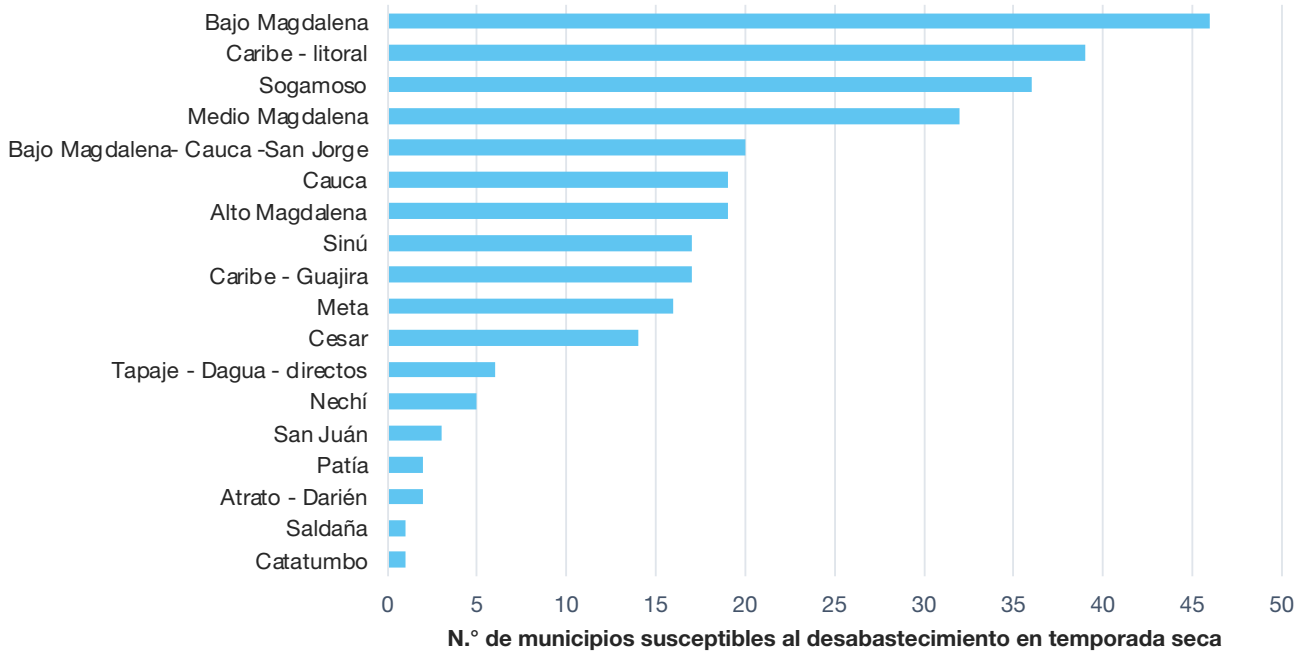


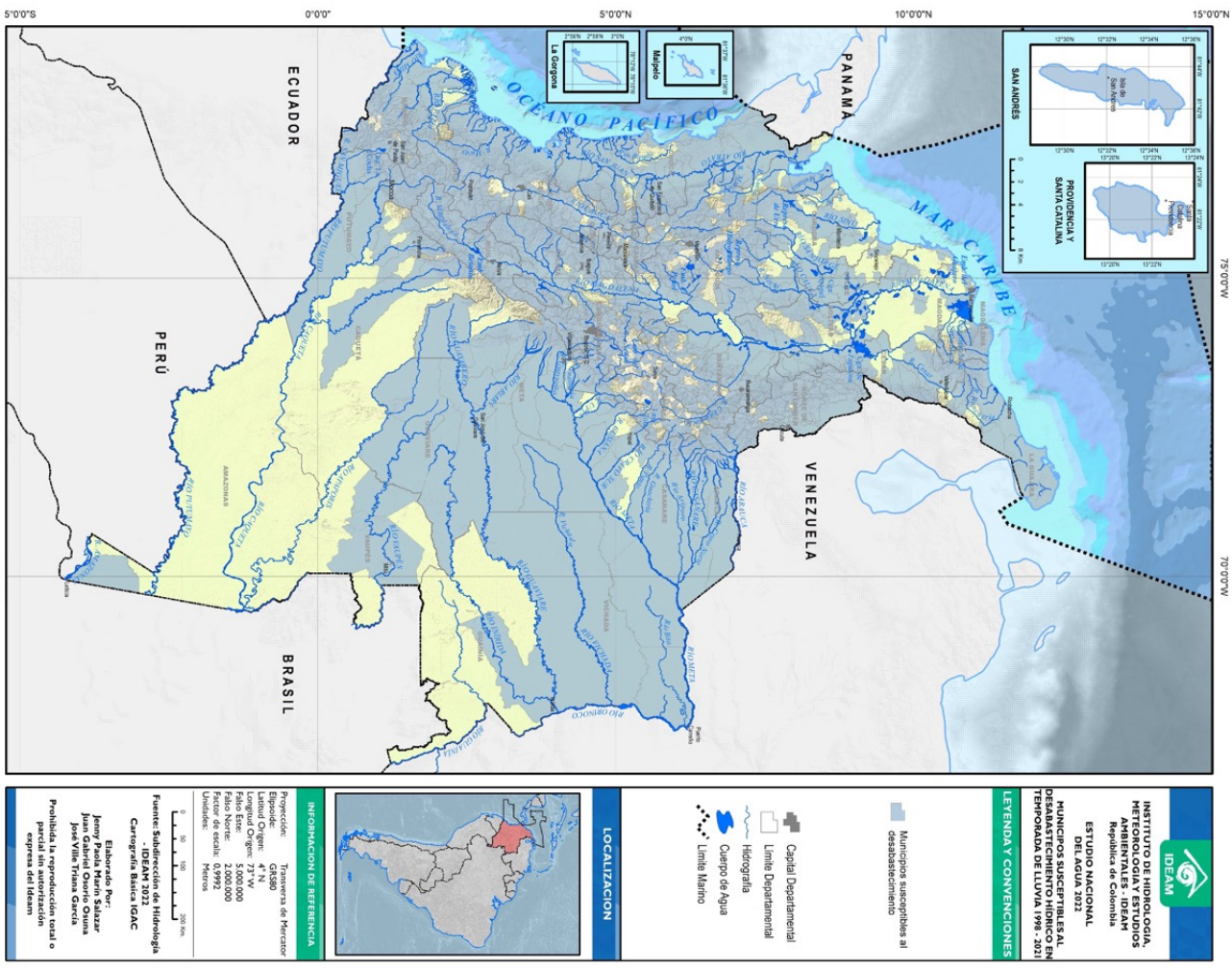

Figura 265. Distribución por zona hidrográfica de los 207 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada seca.

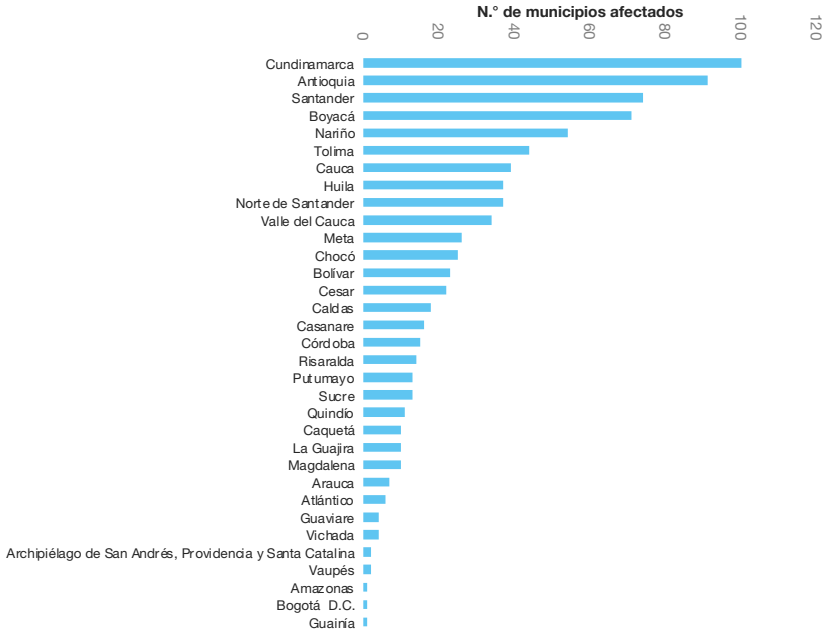
### 9.2.2 Municipios susceptibles al desabastecimiento por temporada de lluvia

Como novedad en el ENA 2022, se resalta la inclusión del listado de municipios susceptibles al desabastecimiento por la ocurrencia de eventos relacionados con lluvia, a partir de la revisión de los consolidados anuales de emergencias de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD, 2022) y el apoyo del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

En el periodo 1998-2021, se han identificado afectaciones en 835 municipios del territorio nacional susceptibles al desabastecimiento con base en la revisión de los consolidados anuales de las fuentes de información disponibles mencionadas y que han presentado, por lo menos, un evento por temporada de lluvia. La información disponible permitió identificar que aproximadamente el 74 % del país ha presentado afectaciones en los sistemas de acueducto por problemas derivados de la ocurrencia de eventos como crecientes súbitas, movimientos en masa, inundaciones, vendavales, tormentas eléctricas, avalanchas y avenidas torrenciales, entre otros. Esta clasificación incluye los municipios que han presentado problemas de desabastecimiento tanto por afectaciones en la fuente hídrica que surte el acueducto como por daños en la infraestructura. La Figura 266 muestra la distribución en el territorio nacional de los 835 municipios que históricamente han evidenciado contingencias en la prestación del servicio de acueducto por la ocurrencia de temporadas de lluvia.

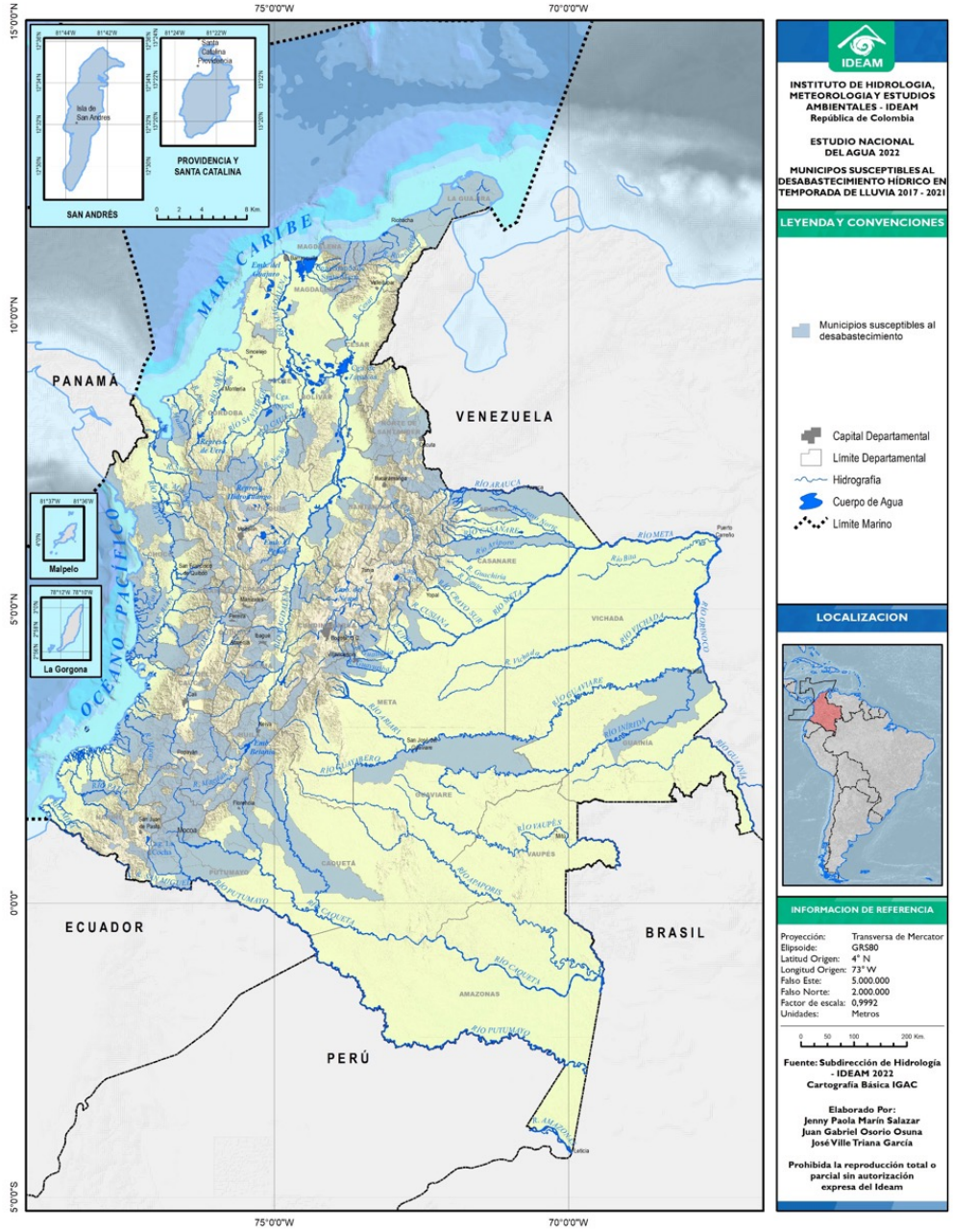
Para el periodo 2017-2021 se identificaron 254 municipios distribuidos en 28 departamentos. En la Figura 267 se puede identificar que los departamentos con más municipios afectados en relación con los 254 son Antioquia, Cauca, Huila, Cundinamarca y Norte de Santander, los cuales ocupan las cinco primeras posiciones. Además, para el mismo periodo, se han tenido afectaciones en catorce capitales departamentales que corresponden a Arauca, San Andrés, Cartagena de Indias, Florencia, Inírida, San José del Guaviare, Neiva, Riohacha, Santa Marta, Villavicencio, Cúcuta, Mocoa, Pereira e Ibagué.

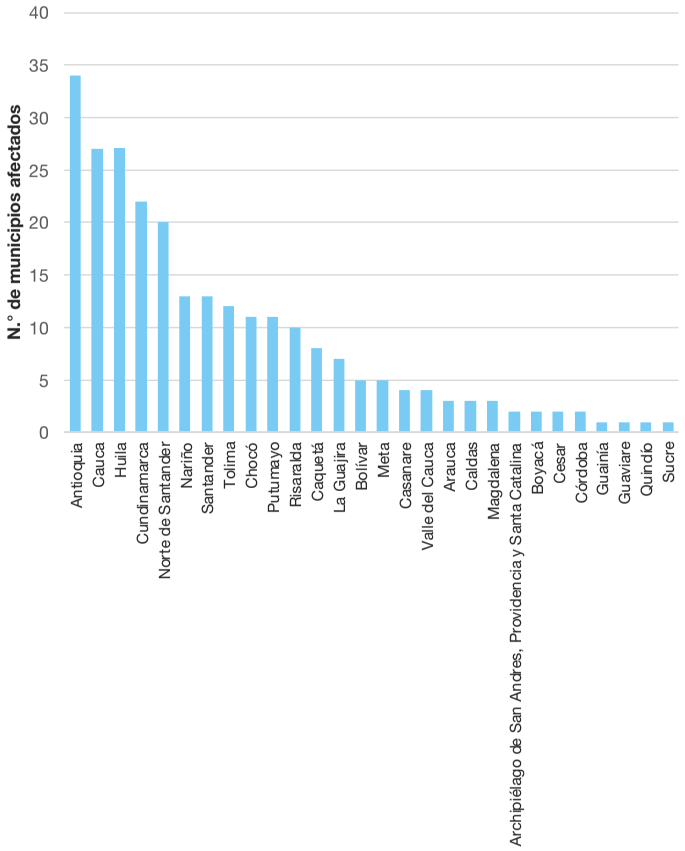



Afectación a nivel departamental, tomando como referencia el número de municipios susceptibles al desabastecimiento.

Figura 266. Distribución de los 835 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada de lluvia. Periodo 1998-2021.




**Afectación** a nivel **departamental**, tomando como referencia el número de municipios susceptibles al desabastecimiento.

Figura 267. Distribución de los 254 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada de lluvia. Periodo 2017-2021.

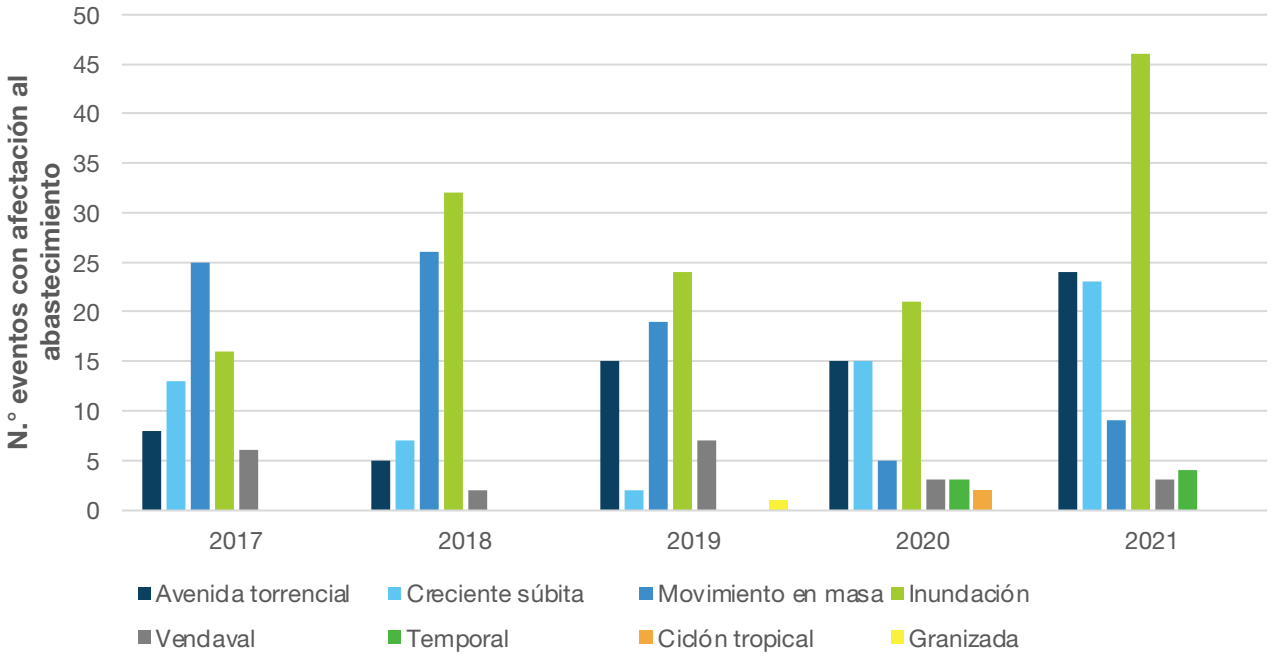



Figura 268. Eventos asociados con lluvia que ocasionaron afectaciones en al abastecimiento de los 254 municipios susceptibles.

Es posible que, una vez se tengan resultados de 2022, la estadística de los municipios afectados aumente debido a la recurrencia y duración del fenómeno de La Niña que inició en el 2021.

Por otra parte, la Figura 268 muestra el número y tipo de eventos que se presentaron en los años comprendidos entre 2017 y 2021, y que generaron una afectación en la prestación del servicio de acueducto en los 254 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada de lluvias. Se evidencia que, en el año 2021, se tuvo la mayor cantidad de eventos asociados con lluvia, lo cual está directamente relacionado con el inicio del fenómeno de La Niña que se empezó a consolidar en dicho año. Así mismo, se resalta que los acueductos son más susceptibles a las inundaciones pues, para el periodo 2017-2021, son los eventos que mayores afectaciones han venido ocasionando.

Con respecto al nivel de recurrencia, el 7 % de los municipios tienen una recurrencia alta, en el 20 % la recurrencia es media y el 3 % restante presenta una recurrencia baja en el periodo 2017-2021. Las mayores afectaciones identificadas a la fecha se tienen en los departamentos de Antioquia, Caquetá, Cauca, Chocó, Huila, Meta, Norte de Santander, Putumayo, Risaralda y Tolima, que suman en conjunto dieciocho municipios con niveles de recurrencia altos en la afectación en su sistema de abastecimiento a causa de temporadas de lluvia. Esto significa que para el periodo 2017-2021 se han presentado interrupciones en la prestación del servicio de acueducto debido a eventos ocurridos en más de dos años. La Figura 269 muestra el nivel de recurrencia por departamento de los municipios que se han identificado como susceptibles al desabastecimiento por temporada de lluvia.

En cuanto al área en la que se ha presentado desabastecimiento, se pudo extraer información correspondiente de los consolidados anuales de emergencias de la UNGRD. Sin embargo, en los casos donde no se especificaba, fue necesario asumir que la totalidad del municipio presentaba afectación. El análisis permitió identificar que el 54 % de estos municipios presentaron afectaciones en sus áreas urbana y rural (mixta), el 8 % únicamente en la zona urbana y el 38 % en la rural. De igual manera, la Figura 270 muestra la distribución del área de afectación en cada uno de los 28 departamentos que presentan municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada de lluvia.

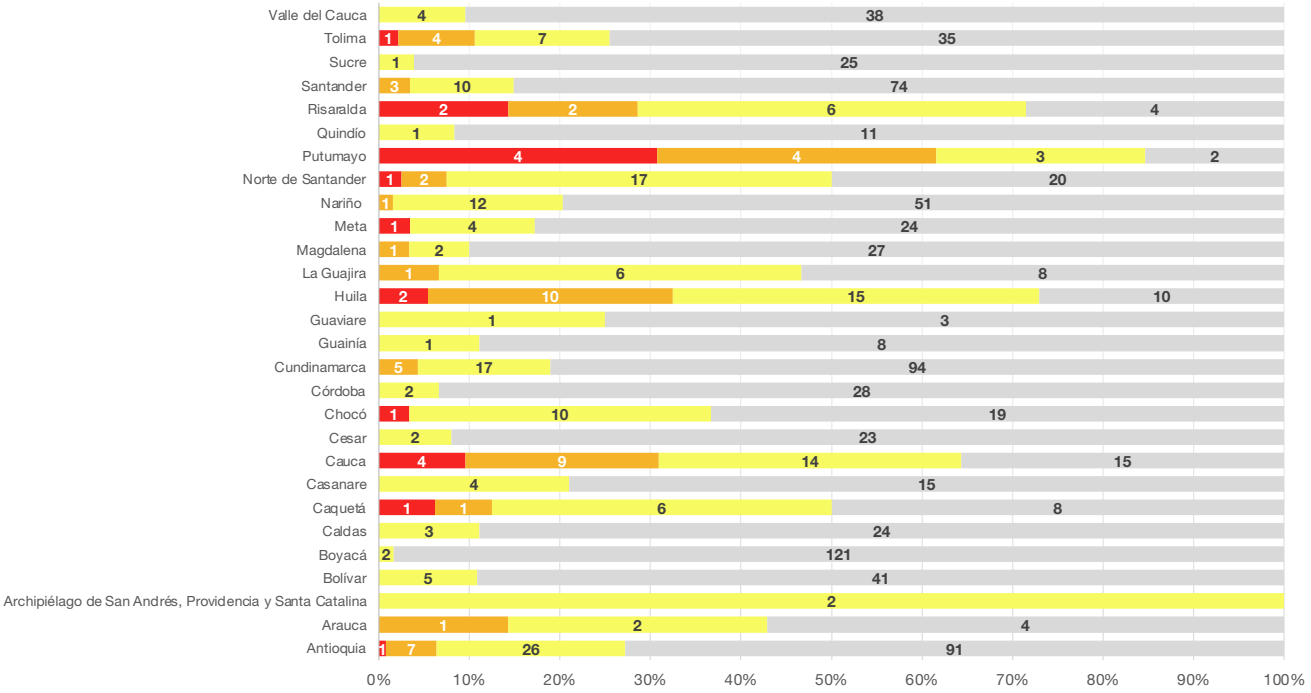



Figura 269. Distribución a nivel departamental de la recurrencia de las afectaciones en los 254 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada de lluvia. Periodo 2017-2021.

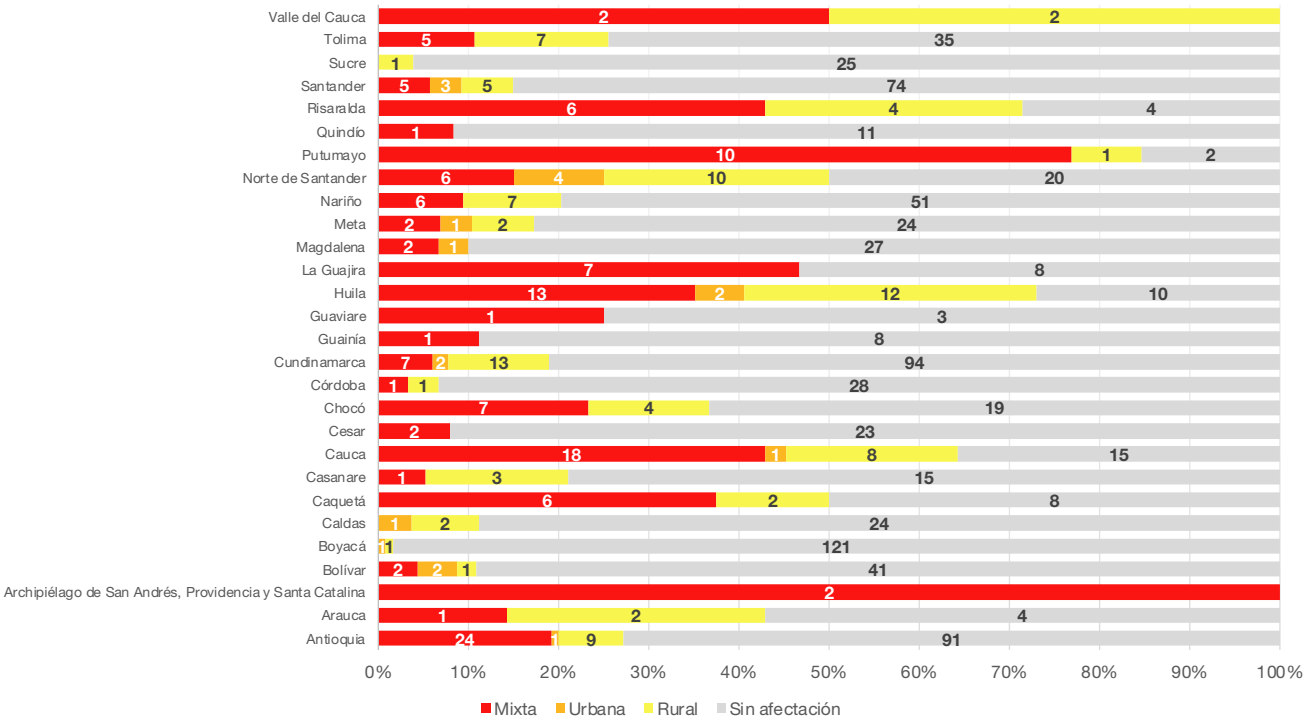



Figura 270. Distribución a nivel departamental del área que ha presentado afectaciones en los 254 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada de lluvia. Periodo 2017-2021.

Los 254 municipios susceptibles al desabastecimiento por temporada de lluvia incluyen afectaciones tanto en fuentes hídricas como en la infraestructura de sus sistemas de acueducto. En este sentido, es importante resaltar que para 67 municipios se pudo evidenciar afectación en fuentes hídricas de tipo superficial, producto de la ocurrencia de eventos desencadenados por la lluvia; 52 han tenido condiciones adversas en su infraestructura, lo que ha limitado la prestación del servicio ante dichos eventos; 90 municipios presentan ambas condiciones y 45 de ellos no tienen información asociada con el tipo de afectación que se presentó en sus acueductos. Esta información se obtuvo de los reportes ante la UNGRD; por tanto, depende directamente de lo descrito en los consolidados anuales de emergencias de dicha entidad.

De la misma manera, en esta versión del ENA se incluye un análisis indicativo en función de las afectaciones que pueden tener los municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada de lluvia por erosión hídrica potencial. Los resultados permiten identificar que 137 municipios (54 %) de los 254 presentan condiciones entre moderadas y muy severas (Figura 271), lo cual los hace aún más vulnerables. Se resalta que el análisis de erosión hídrica potencial corresponde a un valor promedio estimado dentro del polígono que corresponde a la división político-administrativa del municipio y que la fuente de abastecimiento con su respectivo punto de captación no necesariamente se encuentra dentro de estos límites. Los resultados de este análisis son una referencia para determinar el estado de las fuentes hídricas en jurisdicción del municipio.

Así mismo, dentro del análisis de los 254 municipios susceptibles al desabastecimiento por temporada de lluvia —a partir de los consolidados anuales de emergencias de la UNGRD—, se pudo evidenciar que municipios como Amagá, Ciudad Bolívar y San Andrés de Cuerquia, en Antioquia; La Vega, Morales, Sotará y Toribío, en el departamento del Cauca; Acacías y El Calvario, en Meta; La Celia, Pueblo Rico y Santuario, en Risaralda; y Galán, localizado en el departamento de Santander, han presentado afectación en sus sistemas de abastecimiento por la presencia de material de arrastre, represamiento y obstrucción de infraestructura. Estos municipios coinciden con las categorías severa y muy severa de erosión hídrica potencial.

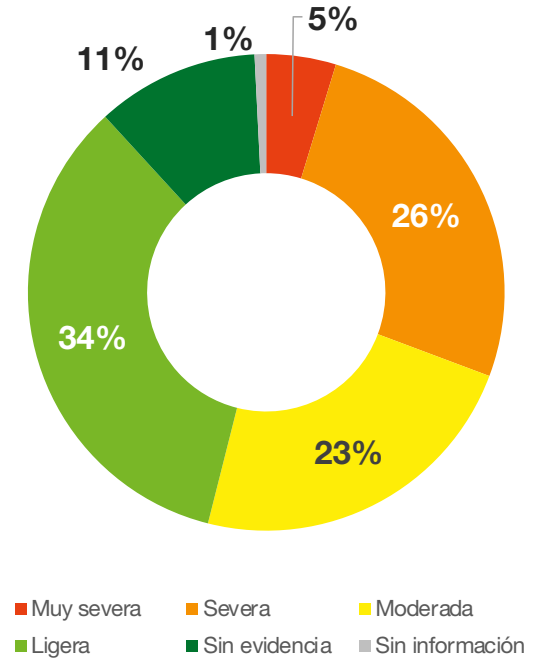



Figura 271. Erosión hídrica potencial en los 254 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada de lluvia.

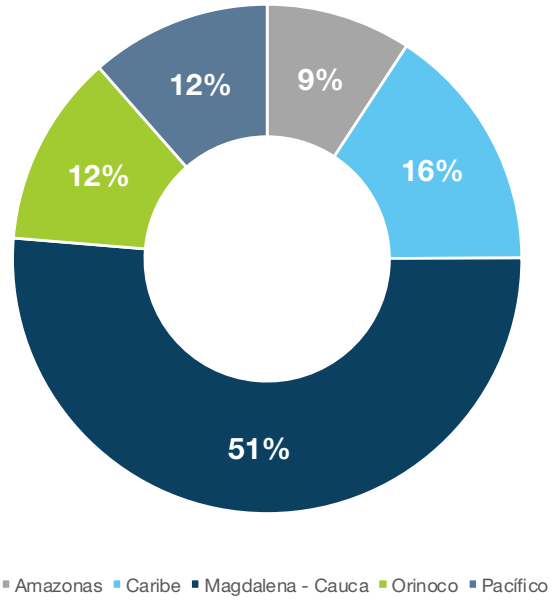



Figura 272. Distribución por área hidrográfica de los 254 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada de lluvia.

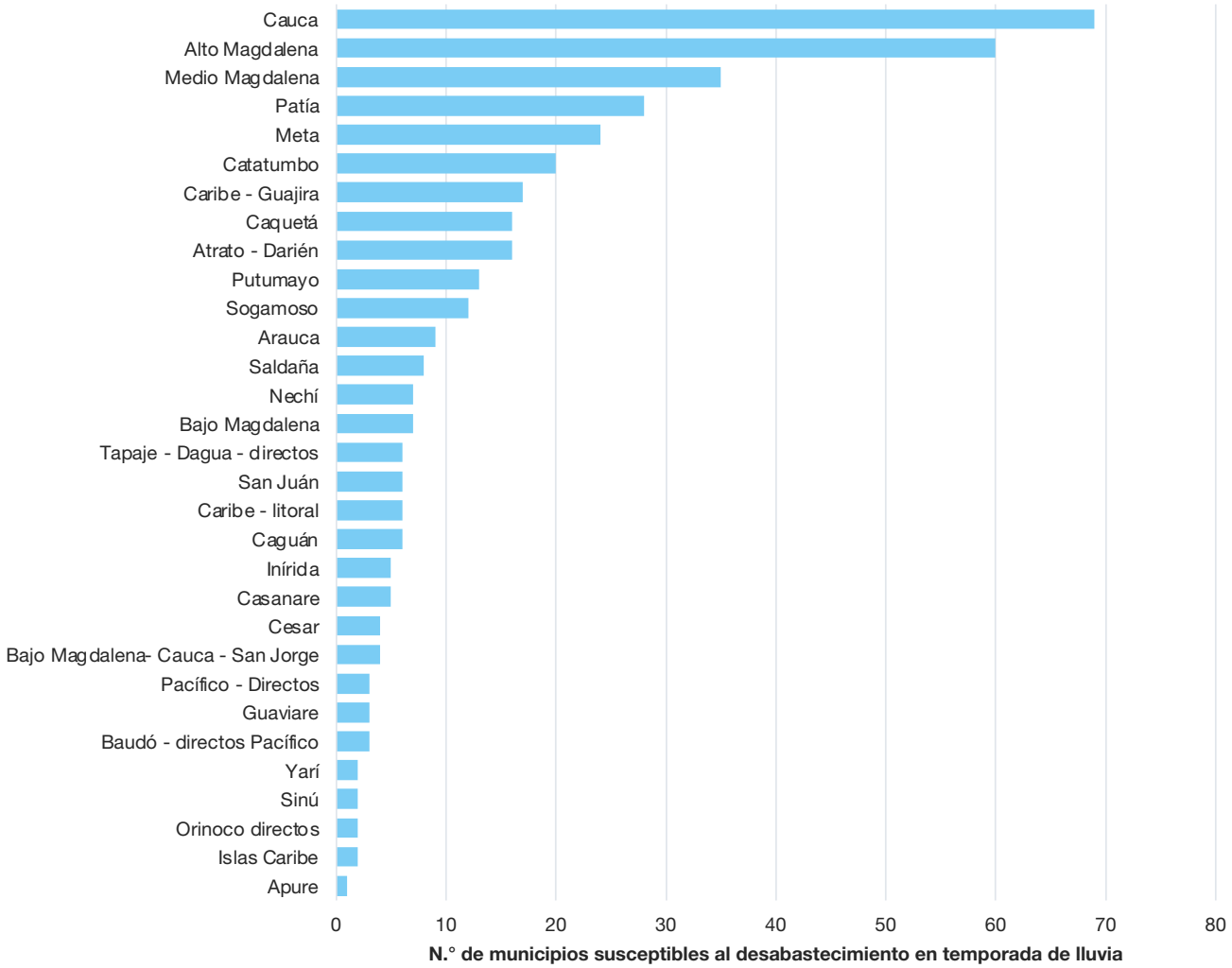



Figura 273. Distribución por zona hidrográfica de los 254 municipios susceptibles al desabastecimiento en temporada de lluvia.

Tomando como referencia la zonificación hidrográfica del Ideam (Ideam, 2013), la Figura 272 representa la distribución por área hidrográfica de los 254 municipios susceptibles al desabastecimiento por temporada de lluvia, evidenciando que el 67 % de ellos se concentran en las áreas hidrográficas Magdalena - Cauca y Caribe.

Respecto al análisis por zona hidrográfica (Figura 273), la mayor cantidad de municipios susceptibles al desabastecimiento por temporada de lluvia se localizan en Cauca, Alto Magdalena, Medio Magdalena, Patía y Meta, que lideran las cinco primeras posiciones en el análisis presentado.

De manera particular se resalta que, dado que los municipios pueden pertenecer a diferentes unidades de la zonificación hidrográfica, los datos en estos niveles pueden diferir.

Por último, con base en los listados de municipios susceptibles al desabastecimiento en temporadas seca y de lluvia, se seleccionaron aquellos que han presentado afectaciones en la prestación del servicio de acueducto en ambos casos. Los resultados obtenidos están consignados en la Tabla 83, donde adicionalmente se relaciona su potencialidad de uso de aguas subterráneas.

Tabla 83. Municipios susceptibles al desabastecimiento tanto en temporada seca como en temporada de lluvia. Periodo 2017-2021.

| Código DANE | Departamento | Municipio | Sistema acuífero asociado | Estado del conocimiento del sistema acuífero | Alternativa de uso conjunto (aguas superficiales-aguas subterráneas) |
|---|---|---|---|---|---|
| 5030 | Antioquia | Amagá | No identificado | Muy bajo | Baja |
| 5045 | Antioquia | Apartadó | SAM 5.1. Golfo de Urabá | Muy alto | Alta |
| 5660 | Antioquia | San Luis | No identificado | Muy bajo | Baja |
| 5837 | Antioquia | Turbo | SAC 5.1. Golfo de Urabá | Muy alto | Alta |
| 13074 | Bolívar | Barranco de Loba | SAC 2.2. La Mojana | Medio | Media |
| 13001 | Bolívar | Cartagena de Indias | SAC 1.3. Arroyo Grande | Alto | Alta |
| | | | SAC 1.4. Turbaco | Medio | Media |
| 13244 | Bolívar | El Carmen de Bolívar | SAC 1.12. Maco | Bajo | Baja |
| | | | SAC 1.1. Morroa | Muy alto | Alta |
| | | | SAC 1.10. Tolú Viejo | Bajo | Baja |
| | | | SAC 2.1. Bajo Magdalena | Bajo | Baja |
| 13458 | Bolívar | Montecristo | SAC 2.2. La Mojana | Medio | Media |
| 15681 | Boyacá | San Pablo de Borbur | No identificado | Muy bajo | Baja |
| 19532 | Cauca | Patía | SAM 3.3. Cauca | Alto | Alta |
| | | | SAM 3.2. Patía | Alto | Alta |
| 20032 | Cesar | Astrea | SAC 2.1. Bajo Magdalena | Bajo | Baja |
| | | | SAC 4.1. Cesar | Alto | Alta |
| 20383 | Cesar | La Gloria | SAM 1.3. Abanico de Aguachica | Medio | Media |
| 23068 | Córdoba | Ayapel | SAM 6.5. Bajo Cauca antioqueño | Alto | Alta |
| | | | SAC 2.2. La Mojana | Medio | Media |
| 23162 | Córdoba | Cereté | SAC 1.9. Arenas Monas | Medio | Media |
| | | | SAC 1.7. Río Sinú | Medio | Media |
| 25394 | Cundinamarca | La Palma | No identificado | Muy bajo | Baja |
| 25805 | Cundinamarca | Tibacuy | SAM 4.6. Sabana de Bogotá | Alto | Alta |

| Código DANE | Departamento | Municipio | Sistema acuífero asociado | Estado del conocimiento del sistema acuífero | Alternativa de uso conjunto (aguas superficiales-aguas subterráneas) |
|---|---|---|---|---|---|
| 44430 | La Guajira | Maicao | SAC 3.2. Alta Guajira | Alto | Alta |
| | | | SAC 3.1. Media Guajira | Muy alto | Alta |
| | | | SAC 4.2. Ranchería | Alto | Alta |
| 44560 | La Guajira | Manaure | SAC 3.2. Alta Guajira | Alto | Alta |
| | | | SAC 3.1. Media Guajira | Muy alto | Alta |
| 44001 | La Guajira | Riohacha | SAC 3.1. Media Guajira | Muy alto | Alta |
| | | | SAC 4.2. Ranchería | Alto | Alta |
| 44847 | La Guajira | Uribia | SAC 3.2. Alta Guajira | Alto | Alta |
| | | | SAC 3.1. Media Guajira | Muy alto | Alta |
| 47001 | Magdalena | Santa Marta | SAC 1.11. Santa Marta | Medio | Media |
| 66075 | Risaralda | Balboa | SAM 3.1. Valle del Cauca | Muy alto | Alta |
| | | | SAM 6.1. Glacis del Quindío | Muy alto | Alta |
| 66318 | Risaralda | Guática | No identificado | Muy bajo | Baja |
| 66440 | Risaralda | Marsella | SAM 6.1. Glacis del Quindío | Muy alto | Alta |
| 68255 | Santander | El Playón | No identificado | Muy bajo | Baja |
| 68432 | Santander | Málaga | No identificado | Muy bajo | Baja |
| 68689 | Santander | San Vicente de Chucurí | SAM 4.7. Tablazo | Bajo | Baja |
| | | | SAM 1.1. Valle medio del Magdalena | Muy alto | Alta |
| 76250 | Valle del Cauca | El Dovio | No identificado | Muy bajo | Baja |

En este sentido, se evidencia que existen 28 municipios en el país con afectaciones en sus sistemas de abastecimiento en ambas temporadas analizadas y, adicionalmente, que el 43 % de ellos cuenta con condiciones que favorecen el aprovechamiento de aguas subterráneas para su abastecimiento de acuerdo con el nivel de conocimiento hidrogeológico de cada región (Ideam, 2019). En estos casos, el uso conjunto de recursos hídricos superficiales y subterráneos de forma coordinada y eficiente (Flores Montoya, 2000) puede solventar las dificultades presentadas en el abastecimiento de los municipios a causa de temporadas secas y de lluvia, de tal manera que permite el aumento de la disponibilidad del agua para atender la demanda del sector do méstico y, por ende, contribuye con la disminución de la susceptibilidad al desabastecimiento hídrico.

## 9.3 Cuencas abastecedoras de acueductos municipales

Teniendo en cuenta la metodología definida en el numeral 9.1.2, se consolidó la información de los sistemas de abastecimiento para 69 municipios del país. Se realizaron solicitudes y búsquedas a través de diferentes fuentes de información que permitieran identificar los puntos de captación del grupo de municipios seleccionados teniendo en cuenta las precisiones indicadas antes; pero persisten las deficiencias en la información y, por tanto, continúan las dificultades para delimitar la totalidad de las cuencas abastecedoras de los territorios en mención.

En este sentido, se resalta que para los 69 municipios se identificaron 193 puntos de captación distribuidos entre agua superficial y agua subterránea. De esos 69 municipios, 58 se abastecen de agua superficial, lo que corresponde al 89 %, como se muestra en la Figura 274. En municipios como Funza, Madrid y Mosquera, en el departamento de Cundinamarca; San Andrés, perteneciente al Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina; y Sincelejo, en Sucre, se identificó un abastecimiento netamente subterráneo; mientras que Maicao, en La Guajira, y Yumbo, en el Valle del Cauca, tienen abastecimiento mixto. Aunque algunos otros municipios seleccionados pueden tener abastecimiento conjunto entre agua superficial y agua subterránea, los ya mencionados fueron los que se pudieron georreferenciar y se logró hacer un análisis en el componente de desabastecimiento hídrico.

También es importante resaltar que, en algunos casos, la cuenca delimitada abarcaba cuencas circundantes pequeñas que abastecen otros municipios, como es el caso de Malambo y Soledad, en Atlántico, cuyos puntos de captación quedan incluidos dentro de la cuenca abastecedora del municipio de Barranquilla. Así como Floridablanca y Girón, del departamento de Santander, cuya área aferente al punto de captación está inmersa dentro de la cuenca abastecedora de Bucaramanga. Lo mismo ocurre con el municipio de Turbaco, Bolívar, que se abastece de la cuenca delimitada para el Canal del Dique, en Cartagena; y, finalmente, Soacha, incluida en la cuenca abastecedora de Bogotá D. C.

Teniendo en cuenta las consideraciones mencionadas, y con el propósito de facilitar la comprensión de la información consolidada en el marco del ENA 2022, se puede consultar el **Anexo 8c**, que incluye de manera detallada la caracterización de los puntos de captación identificados para los 69 municipios, así como su georreferenciación. Del mismo modo, en la Figura 275 se representa la distribución en el territorio nacional de las cuencas abastecedoras delimitadas y los puntos de captación asociados para los municipios seleccionados.

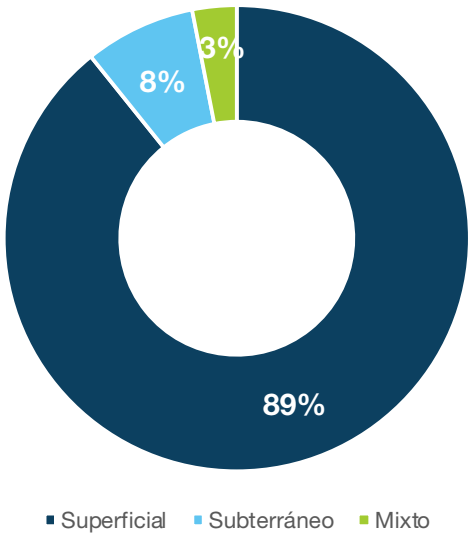



Figura 274. Distribución por tipo de fuente hídrica de abastecimiento en los 69 municipios seleccionados para el análisis.

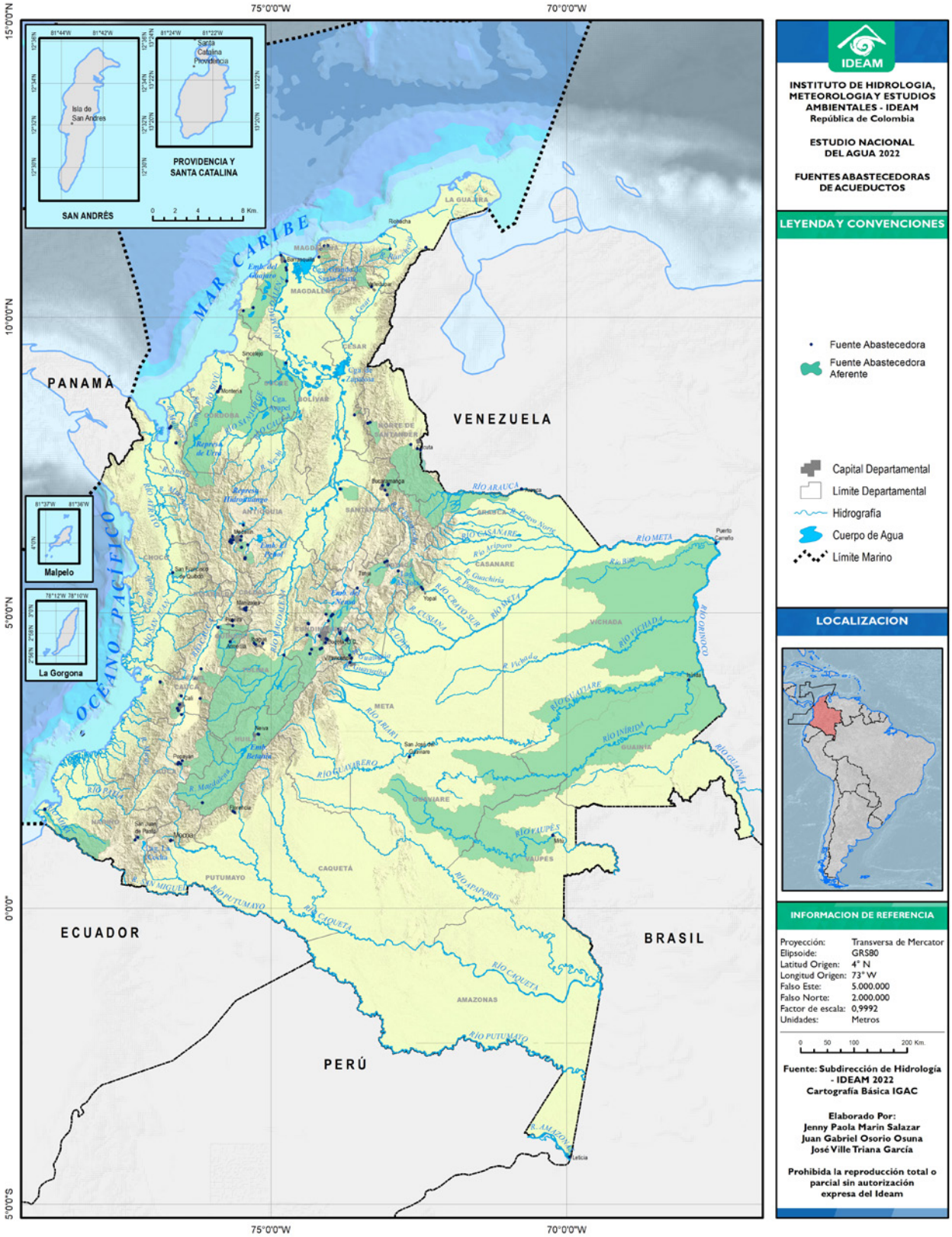



Figura 275. Fuentes abastecedoras de acueductos de 69 municipios en Colombia.

Así mismo, en cuanto al análisis de los indicadores que hacen parte del Estudio Nacional del Agua, se consolidó en el **Anexo 8c** información para 101 cuencas abastecedoras —en las cuales se trabajó de manera articulada con los componentes de oferta hídrica, sedimentos, calidad del agua y sequías del Estudio— con el propósito de estimar en estas unidades de análisis el comportamiento de los indicadores asociados.

Se resalta la variación existente en las áreas de las cuencas abastecedoras delimitadas. Municipios como Puerto Carreño, en el Vichada; Inírida, en Guainía; Girardot, en Cundinamarca; y Mitú, en Vaupés, cuentan con áreas de abastecimiento superiores a los 20.000 km². Esto en contraste con municipios como Medellín, Manizales y Mocoa, en donde algunas de sus cuencas abastecedoras tienen áreas significativamente pequeñas que incluso son inferiores a 1 km². Lo anterior ha llevado a generar cierto nivel de incertidumbre en las aproximaciones que se entregan frente a la estimación de los indicadores hídricos en cuencas abastecedoras, toda vez que los resultados de los componentes del Estudio Nacional del Agua son indicativos a escala nacional, siendo la *subzona hidrográfica* la mínima unidad de análisis; por lo tanto, en áreas pequeñas no son tan exactos.

Respecto a los indicadores asociados con la *oferta hídrica total superficial*, se realizó el análisis del porcentaje de aumento o disminución que pueden tener las cuencas abastecedoras bajo condiciones hidrológicas de año seco y año húmedo. Se evidencia que la oferta puede disminuir en año seco entre un 50 % en municipios como Quibdó (Chocó) y un 90 % aproximadamente en Maicao (La Guajira); y aumentar entre el 65 % en Leticia (Amazonas) y más del 600 % en Maicao (La Guajira) en año húmedo.

En cuanto a las condiciones naturales de aridez en estas unidades de análisis, el *índice de aridez* refleja que el 98 % de las cuencas abastecedoras presentan condiciones de entre moderados y altos excedentes de agua; y tan solo un 2 %, perteneciente a los municipios de Barranquilla y Maicao, se encuentran en categoría de moderado a deficitario de agua (Figura 276).

Para estimar el *índice de retención y regulación hídrica* (IRH) en las cuencas abastecedoras —y teniendo en cuenta la metodología establecida en el componente de agua superficial del ENA, en donde los datos de caudal son insumo para la construcción de las curvas de duración de caudales medios diarios—, se pudo obtener información representativa solo para 27 de las 101 cuencas delimitadas. Los resultados representados en la Figura 277 permiten concluir que el 86 % de las cuencas abastecedoras a las que se les estimó el IRH cuentan con condiciones de regulación en categoría alta o moderada, lo cual indica una homogeneidad en sus caudales. En contraste con el 14 % de las cuencas, cuyas condiciones asociadas al IRH son bajas.

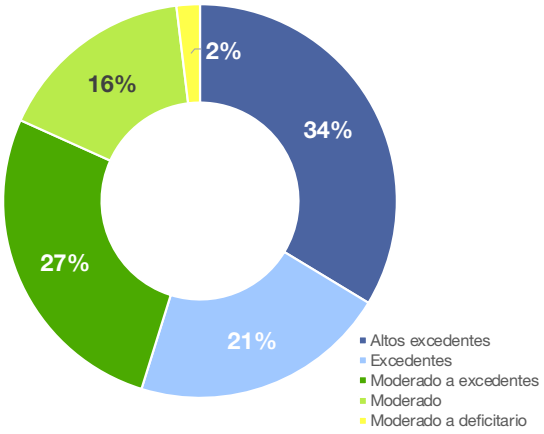



Figura 276. Distribución del índice de aridez en cuencas abastecedoras.

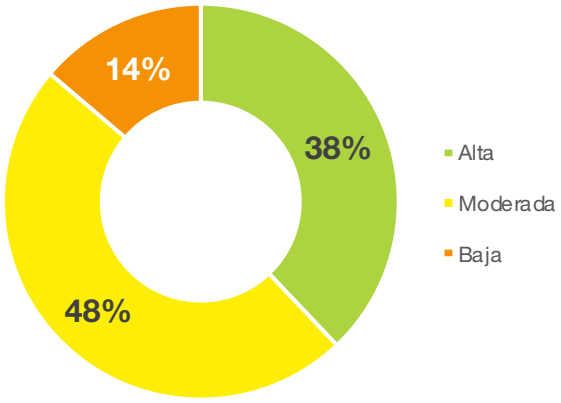



Figura 277. Distribución del índice de retención y regulación hídrica (IRH) en cuencas abastecedoras.

Con relación al análisis de sedimentos en cuencas abastecedoras, se presentan en la Figura 278 los resultados para el indicador *rendimiento de sedimentos*, que evidencia que 91 % de las cuencas abastecedoras presentan condiciones entre medio y muy bajo de la categoría del indicador y el 9 % restante se encuentran entre las categorías alto y muy alto, siendo los valores más críticos los asociados a algunas de las cuencas abastecedoras de los municipios de Medellín y Villavicencio.

De igual manera, se realizó el análisis conjunto con el componente de calidad del agua, asociando los puntos de monitoreo de calidad a las captaciones de los acueductos de los municipios analizados. Se tuvo correspondencia en once puntos; de estos, el asociado a la bocatoma del río Pasto, que abastece la capital de Nariño, cuenta con un ICA categoría *malo* para el año 2021, producto de concentraciones significativamente altas en cuatro de los seis parámetros para el cálculo del indicador (DQO, SST, NT y PT), los cuales es probable que estén influenciados por la presencia de aguas residuales domésticas sobre la corriente hídrica de abastecimiento. El resto de los puntos de monitoreo están en las categorías regular y aceptable del ICA, tal como se presenta en la Tabla 84, donde además se señalan en color gris los parámetros cuyas concentraciones están fuera de los rangos normales y afectan la categorización del indicador.

Respecto al análisis de sequías, en las 101 cuencas abastecedoras delimitadas para los 69 municipios seleccionados se utilizó el índice multivariado de precipitación, humedad del suelo y escorrentía para tres meses (MSDIPreSmoEsc03); se evidenció que, para el periodo 2017-2020, las cuencas abastecedoras analizadas presentaron valores mínimos del indicador que permitieron categorizarlas en los rangos de Sequía severa (-1,3 a -1,6), Sequía extrema (-1,6 a -2) y Sequía excepcional (-2), que han afectado 3 %, 22 % y 75 % de las cuencas abastecedoras delimitadas, respectivamente (Figura 279); esto muestra la susceptibilidad de sus sistemas hídricos a la ocurrencia de periodos secos. De igual manera, se resalta del análisis que el año que tuvo mayor influencia de los eventos de sequía en estas cuencas fue el 2019, con 63 cuencas afectadas.

Finalmente, el *índice de uso del agua* (IUA) y el *índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento* (IVH) solo pudieron estimarse para 27 de las 101 cuencas delimitadas, ya que persisten las limitaciones en la información relacionada con el caudal captado por las empresas prestadoras del servicio de acueducto.

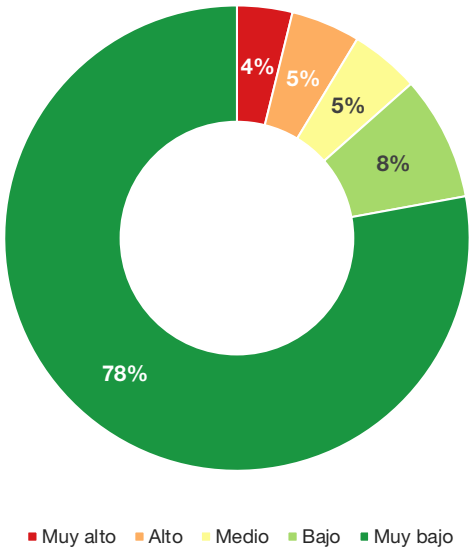



Figura 278. Distribución del indicador de rendimiento de sedimentos en cuencas abastecedoras.

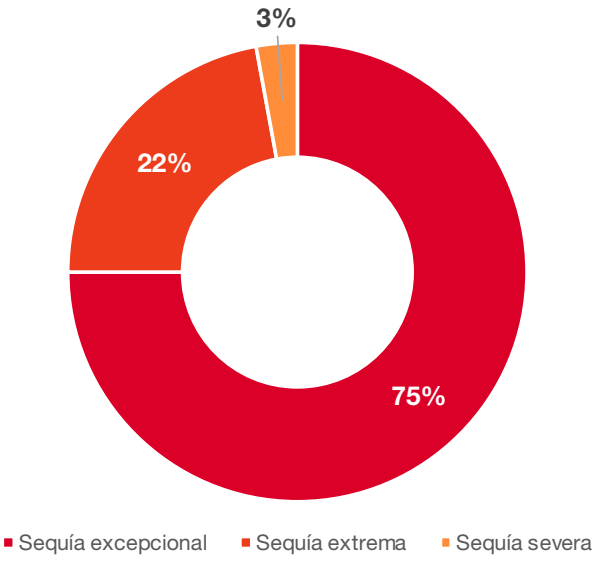



Figura 279. Distribución del indicador de sequías MSDIPreSmoEsc03 en 69 cuencas abastecedoras. Periodo 2017-2020.

Tabla 84. Análisis de calidad del agua en cuencas abastecedoras.

| ID | Nombre | Municipio | Área (km²) | Corriente | Calidad del agua | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | % Sat. | CE uS/cm | DQO mg/L | pH unidades pH | SST mg/L | NT mg /L | PT mg/L | ICAFQ 6 VAR | Descriptor |
| 13 | Empopasto S.A. E. S. P. | Pasto | 68.78 | Río Pasto | 86.06 | 23.2 | 554 | 6.51 | 1693 | 7.28 | 3.1 | 0.47 | Malo |
| 39 | Veolia Aguas de Montería S.A. E. S. P. | Montería | 8518.50 | Río Sinú | 84.11 | 108 | 10 | 7.18 | 96 | 0.8 | 0.14 | 0.75 | Aceptable |
| 40 | Aguas Nacionales EPM S. A. E. S. P. | Quibdó | 170.64 | Río Atrato | 69.80 | 29.6 | 16 | 6.19 | 83 | 0.8 | 0.093 | 0.72 | Aceptable |
| 46 | Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Villavicencio E. S. P. | Villavicencio | 648.63 | Río Guatiquía | 73.94 | 110 | 10 | 7.47 | 336 | 1.71 | 0.51 | 0.58 | Regular |
| 46 | Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Villavicencio E. S. P. | Villavicencio | 648.63 | Río Guatiquía | 89.00 | 111 | 14 | 7.74 | 640 | 1.18 | 0.23 | 0.63 | Regular |
| 51 | Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Pereira S.A.S.E. S. P. | Pereira | 296.54 | Río Otún | 79.15 | 126 | 10 | 7.62 | 5 | 0.8 | 0.051 | 0.86 | Aceptable |
| 51 | Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Pereira S.A.S.E.S.P. | Pereira | 296.54 | Río Otún | 92.62 | 197 | 10 | 7.36 | 5 | 1.01 | 0.054 | 0.83 | Aceptable |
| 52 | Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S. A. E. S. P. | Bucaramanga | 551.26 | Río Suratá | 95.40 | 150 | 10 | 6.7 | 24 | 0.8 | 0.086 | 0.76 | Aceptable |
| 52 | Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S. A. E. S. P. | Bucaramanga | 551.26 | Río Suratá | 87.98 | 164 | 10 | 6.41 | 136 | 0.8 | 0.34 | 0.63 | Regular |
| 52 | Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S. A. E. S. P. | Bucaramanga | 551.26 | Río Suratá | 59.16 | 123 | 21 | 6.96 | 278 | 0.8 | 0.58 | 0.54 | Regular |
| 56 | Empresa Ibaguereña de Acueducto y Alcantarillado S. A. E. S. P Oficial | Ibagué | 164.96 | Río Combeima | 84.09 | 256 | 28 | 8.18 | 123 | 0.8 | 0.24 | 0.51 | Regular |
| 61 | Empresa Reg. Comunitaria Admón. Pública Cooperativa de Serv. Públicos Domici. Acue. Alcan. y Aseo | Inírida | 41859.66 | Río Inírida | 37.17 | 10.5 | 19 | 4.69 | 6 | 0.8 | 0.05 | 0.74 | Aceptable |
| 63 | Sociedad de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Barranquilla S. A. E. S. P. | Barranquilla | 1129.46 | Río Magdalena | 89.95 | 121 | 10 | 7.39 | 188 | 0.8 | 0.33 | 0.67 | Regular |
| 65 | Empresa de Obras Sanitarias de Leticia E. S. P. «en liquidación» | Leticia | 136.85 | Río Amazonas | 64.54 | 151 | 10 | 7.64 | 167 | 0.8 | 0.22 | 0.62 | Regular |
| 71 | Empresas Públicas de Medellín EPM E. S. P. | Rionegro | 214.19 | Río Negro | 96.55 | 61.2 | 10 | 6.56 | 27 | 1.61 | 0.076 | 0.77 | Aceptable |

Para el IUA se emplearon los valores de caudal captado en Mm³/año, aportados bien sea a través de la respuesta a la solicitud de información remitida a los prestadores o por medio de consulta propia en fuentes de información pertenecientes a la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios o en el Sistema de Información del Recurso Hídrico. Por su parte, y dada la incertidumbre existente en unidades de análisis menores a la subzona hidrográfica, la oferta hídrica disponible fue usada con fines netamente indicativos. Es importante resaltar que, para mayor precisión en los resultados, en el orden regional y local se deben implementar estrategias de monitoreo integral que permitan realizar una evaluación mucho más precisa en escalas de trabajo detalladas.

Los resultados del IUA en las 27 cuencas sobre las cuales se pudo realizar la estimación del indicador permiten evidenciar que las mayores presiones (IUA crítico) por uso doméstico con respecto a la oferta hídrica disponible en año hidrológico medio se tienen en la cuenca abastecedora del municipio de Floridablanca (Santander), cuyo acueducto se surte del río Frío.

Bajo condiciones hidrológicas de año seco, el número de cuencas abastecedoras analizadas donde la demanda por uso doméstico supera la oferta disponible (IUA crítico) se incrementan a nueve. Los municipios de Pasto (río Pasto), Popayán (río Las Piedras), Santa Marta (ríos Gaira y Manzanares), Ibagué (río Combeima), Santiago de Cali (río Cali), Duitama (río Surba), Floridablanca (Río Frío) y Bucaramanga (río Tona) son los más afectados.

Por último, con respecto al *índice de vulnerabilidad hídrica* por desabastecimiento, para condiciones hidrológicas promedio se identificaron diez cuencas abastecedoras que tienen «alta» vulnerabilidad al desabastecimiento y una en categoría «muy alta», perteneciente al municipio de Floridablanca, en Santander. El número de cuencas abastecedoras con categoría «muy alta» del indicador asciende a nueve para condiciones hidrológicas de año seco, siendo consecuente con los resultados del IUA presentados antes.

## 9.4 Consideraciones en el tema de desabastecimiento municipal

Se resalta la importancia de contar en el país con una base de datos interinstitucional detallada, estructurada y estandarizada que permita robustecer los análisis que se realizan en torno a las afectaciones presentadas a nivel municipal por la ocurrencia de eventos hidroclimatológicos y, en particular, sobre la prestación del servicio de acueducto.

Es importante avanzar en la georreferenciación de las captaciones de los acueductos municipales de Colombia, de forma que se puedan fortalecer los análisis y se tengan conclusiones mucho más precisas en torno a la susceptibilidad al desabastecimiento hídrico de las poblaciones.

Dado que la información es insuficiente para cubrir en su totalidad los aspectos que se requieren en el análisis del componente de desabastecimiento hídrico, es importante fortalecer la información relacionada con la caracterización de fuentes hídricas de abastecimiento e incentivar el monitoreo de cantidad y calidad de agua en ellas, con el objetivo de tener mejor resolución que soporte la toma de decisiones enmarcadas en la gestión integrada del agua.

La implementación de estrategias de abastecimiento —como los acueductos regionales en zonas del país con problemáticas asociadas con el uso del recurso hídrico y aumento considerable de su población— han ayudado a solventar las dificultades presentadas en torno al manejo de la demanda hídrica para consumo humano. En este sentido, se garantiza la ampliación de la cobertura y la sostenibilidad de las empresas de servicios públicos, y se mejora la calidad y continuidad de la prestación del servicio de acueducto en el territorio nacional. Se destaca, por ejemplo, que en departamentos como Antioquia (en particular el área metropolitana y Rionegro) y en Bogotá D.C. es bajo el nivel de afectación por situaciones de desabastecimiento asociadas tanto con temporadas secas como de lluvia. Así mismo, se resalta la disminución de la problemática en el departamento de Santander, asociada principalmente a la implementación de estrategias y soluciones a nivel operativo para hacer frente a la afectación por desabastecimiento.



**Foto por:**
Juan José Montoya Monsalve
Ciénaga de Paredes

# OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE EN COLOMBIA – ODS 6

**Autoras:**

**IDEAM:**
Jenny Paola Marín Salazar
Claudia Nicol Tetay

CAPÍTULO 10

# Capítulo 10. Objetivos de Desarrollo Sostenible en Colombia – ODS 6

La agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) propone diecisiete Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) con 169 metas correspondientes, a las cuales se les hace seguimiento a través de indicadores y resultados de cada país, que pueden ser comparados y ofrecer un panorama global para el acompañamiento de las Naciones Unidas (ANA, 2019). El objetivo 6 de los ODS denominado *Agua limpia y saneamiento*, tiene como propósito «Garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua y saneamiento para todos», y permite evaluar los escenarios de cada país en cuanto a la disponibilidad de recursos hídricos en cantidad y calidad; usos del agua para las actividades humanas; acciones de conservación de los ecosistemas acuáticos; gestión de los recursos hídricos; y acceso al abastecimiento de agua, alcantarillado y tratamiento de aguas residuales (ANA, 2019). La Figura 280 muestra las metas relacionadas con el ODS 6, de tal manera que se abarcan los componentes antes mencionados.

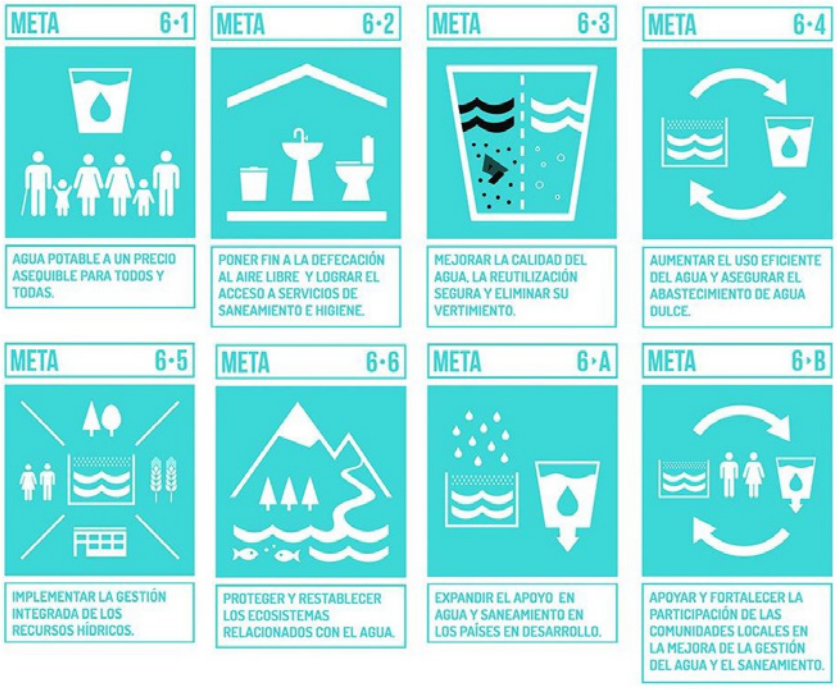



Figura 280. Metas del ODS 6, llamado *Agua limpia y saneamiento*.

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), como entidad técnica y científica del Sistema Nacional Ambiental (SINA), es la fuente oficial de información ambiental y autoridad en las áreas de hidrología y meteorología en Colombia. En este contexto, y en el marco de sus funciones, se encarga de proveer datos, estadísticas, indicadores e información que sirven como insumos para la evaluación del agua, los recursos hídricos y su gestión en el país. Esta evaluación se sintetiza en el Estudio Nacional del Agua, que se elabora periódicamente para aportar información y conocimiento sobre el estado, la dinámica y las interacciones del agua con el medio natural y con la sociedad (Ideam, 2019).

En esta sección del ENA 2022, se presenta el aporte del Ideam al proceso de monitoreo y reporte de tres de las ocho metas asociadas al ODS 6, tomando como referencia principalmente los insumos generados en las diferentes temáticas del Estudio Nacional del Agua, así como productos desarrollados en otras áreas misionales del Ideam pertinentes para este ODS.

## 10.1 Aportes del Ideam para el reporte de indicadores ODS 6

Las metas asociadas al objetivo 6 de los ODS, con las cuales tiene relación la Subdirección de Hidrología del Ideam, son: la meta 6.3: «Mejorar la calidad del agua, la reutilización segura y eliminar su vertimiento»; la 6.4: «Aumentar el uso eficiente del agua y asegurar el abastecimiento de agua dulce»; y la meta 6.5: «Implementar la gestión integrada de los recursos hídricos», cuyos indicadores asociados se presentan en la Figura 281.

La Figura 281 esquematiza el flujo de información y el rol que desempeña cada entidad del orden nacional y global en la generación, la aprobación, la consolidación y el reporte de los indicadores asociados. En este sentido, desde el Ideam se generan los insumos técnicos relacionados con las variables e indicadores solicitados por la iniciativa, en concordancia con las hojas metodológicas definidas por el custodio, en las que se relacionan de manera detallada el concepto y el proceso para la estimación de cada indicador. Estos insumos son remitidos a la cabeza del sector ambiente en Colombia, liderado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), quien aprueba y consolida los aportes de las diferentes entidades del Sistema Nacional Ambiental (SINA), no solo para el ODS 6, sino para todos aquellos que hacen parte del sector. Posteriormente, la oficina de estadísticas nacionales —en este caso el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE)— recopila la información remitida por el MADS y las demás entidades que desempeñan este rol para los reportes de los diecisiete ODS en Colombia; y luego la envía al organismo internacional u «organismo custodio" encargado del reporte final, quien calcula, analiza y divulga los resultados en los medios dispuestos para tal fin.

De acuerdo con los requerimientos de los organismos custodios para el reporte, a continuación se describen los insumos y los avances que se han tenido por parte del Ideam como aportes para el seguimiento de los indicadores asociados a las metas antes descritas.




Figura 281. Indicadores asociados a metas ODS con las cuales tiene compromisos el Ideam a través de la subdirección de Hidrología.

### 10.1.1 Indicador 6.3.2 - Proporción de masas de agua de buena calidad

Para la evaluación de las condiciones ambientales de calidad del agua de un país se estableció la meta 6.3, la que tiene como propósito:

> De aquí a 2030, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial. (UN Water, 2022a)

Para este propósito, se definió el indicador *6.3.2 Proporción de masas de agua de buena calidad*, cuyo organismo custodio es el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (Pnuma). Este indicador se basa en datos de calidad del agua derivados de mediciones *in situ* y el análisis de muestras en el laboratorio, y proporciona información sobre la calidad del agua dulce y cómo cambia con el tiempo (Pnuma, 2020).

La metodología propuesta por Pnuma sugiere dos niveles de reporte: en el primer nivel (Nivel 1) se encuentran los parámetros fisicoquímicos básicos de calidad del agua fácilmente medibles. En el Nivel 2 se incluyen sustancias tóxicas, monitoreo biológico y esquemas de clasificación de la calidad del agua más sofisticados. En la actualidad, a escala nacional se cuenta con los datos —generados desde el Ideam, a partir del monitoreo de la Red de Referencia Nacional de Calidad del Agua— para el reporte del indicador teniendo en cuenta el Nivel 1 en ríos, el cual incluye un conjunto de parámetros fisicoquímicos generales de calidad del agua, como se observa en la Figura 282. Estos datos permiten evaluar las condiciones de la calidad del agua facilitando la comparabilidad global y manteniendo un equilibrio entre la importancia del indicador y los requisitos de seguimiento de cada país (Pnuma, 2020).

Para el reporte por parte de Colombia, el Ideam en conjunto con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible propusieron el seguimiento del indicador a nivel de corriente para el río Bogotá, el cual cuenta con ocho puntos de la Red de Referencia Nacional de Calidad del Agua, monitoreados entre 2 y 4 veces al año (Figura 283).

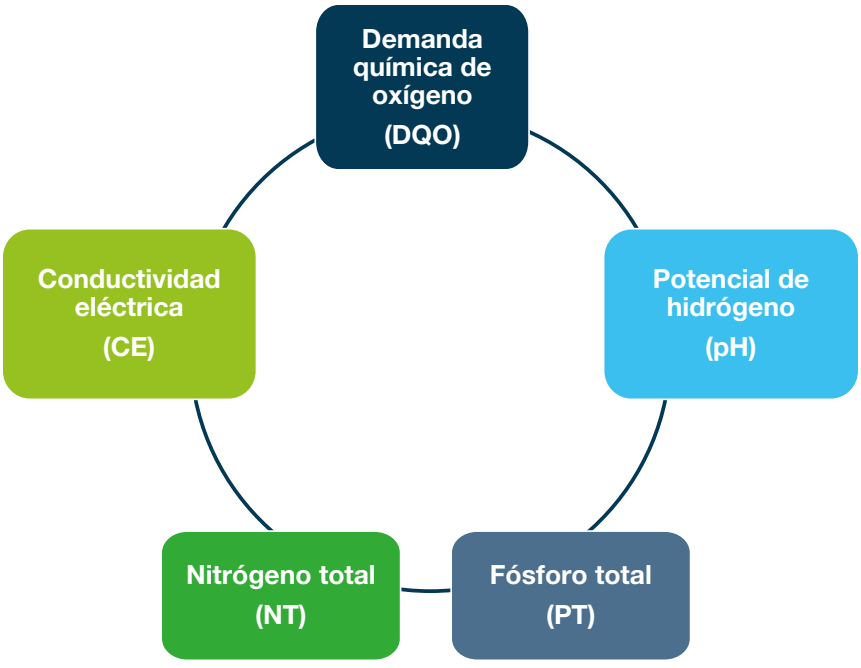



Figura 282. Variables medidas en el Nivel 1 para indicador ODS 6.3.2

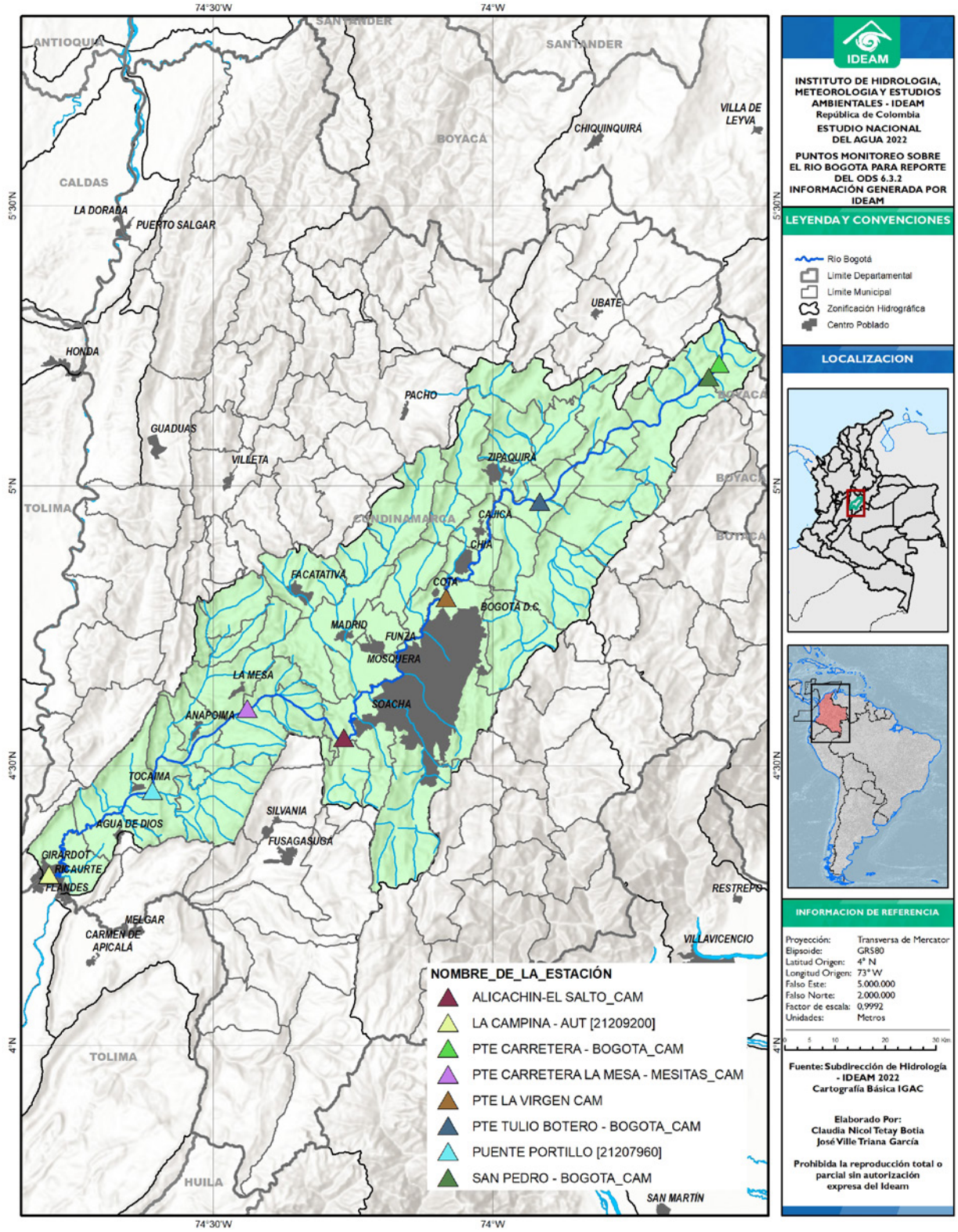



Figura 283. Puntos de monitoreo sobre el río Bogotá para el reporte del ODS 6.3.2. Información generada por el Ideam.

El indicador 6.3.2 utiliza un enfoque basado en objetivos para clasificar la calidad del agua. Esto significa que los valores medidos se comparan con valores numéricos que representan «buena calidad del agua ambiental», lo cual indica que no daña la función del ecosistema y la salud humana, de acuerdo con los indicadores básicos de calidad del agua.

### 10.1.2 Indicador 6.4.1 - Cambio en el uso eficiente de los recursos hídricos con el paso del tiempo e indicador 6.4.2 - Nivel de estrés hídrico: extracción de agua dulce en proporción a los recursos de agua dulce disponibles

Junto a la calidad del agua, es importante analizar la evolución de la cantidad del agua y de sus usos para garantizar su adecuada gestión integral. En este sentido se definió la meta 6.3, que tiene como propósito:

> De aquí a 2030, aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir considerablemente el número de personas que sufren falta de agua.

De esta manera, suministra un panorama general del grado de apropiación de los recursos hídricos de un país para el aprovisionamiento del agua a la población y para sus actividades productivas (ANA, 2019).

Para este fin, se definieron los indicadores *6.4.1 Cambio en el uso eficiente de los recursos hídricos con el paso del tiempo y 6.4.2 Nivel de estrés hídrico: extracción de agua dulce en proporción a los recursos de agua dulce disponibles,* cuyo organismo custodio es la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por su sigla en inglés).

La eficiencia en el uso del agua en Colombia es la suma de las eficiencias en los principales sectores económicos, ponderadas en función de la proporción de agua extraída por cada sector respecto de las extracciones totales. El indicador 6.4.1 mide los cambios en la eficiencia en el uso del agua y tiene la finalidad de abordar el componente económico de la meta 6.4 de los ODS.

Por otro lado, el indicador 6.4.2 corresponde a la razón entre el total de agua dulce extraída por los principales sectores económicos y el total de recursos hídricos renovables, teniendo en cuenta las necesidades ambientales de agua. Este indicador también se conoce como *intensidad de extracción de agua* y mide los progresos hacia la meta 6.4 de los ODS.

Los insumos para el reporte de los indicadores 6.4.1 y 6.4.2 son consignados en el formulario Aquastat de la FAO. Los datos recopilados a través de este cuestionario tienen como objetivo proporcionar una visión global de los recursos hídricos y usos del agua a nivel de cada país, y describir sus principales características, tendencias, limitaciones y perspectivas, prestando especial atención al sector agrícola (FAO, 2021).

En la Figura 284, se hace una breve descripción de la información entregada por el Ideam, y las equivalencias con los códigos y nombres de las variables que se encuentran en el formulario.

La información sobre estos dos indicadores es solicitada de manera anual por la FAO, quien tiene el rol de organismo custodio. El Ideam ha venido aportando insumos desde el año 2018 para la consolidación y reporte de estos indicadores. Cabe resaltar que, dado que la periodicidad del ENA es cuatrienal, los insumos entregados corresponden a los años base de elaboración de los ENA 2014 y 2018. De manera anual, la única cifra que cuenta con actualización es la correspondiente a los recursos hídricos renovables totales, equivalente a la *oferta hídrica total superficial histórica*, con un rezago de dos años.

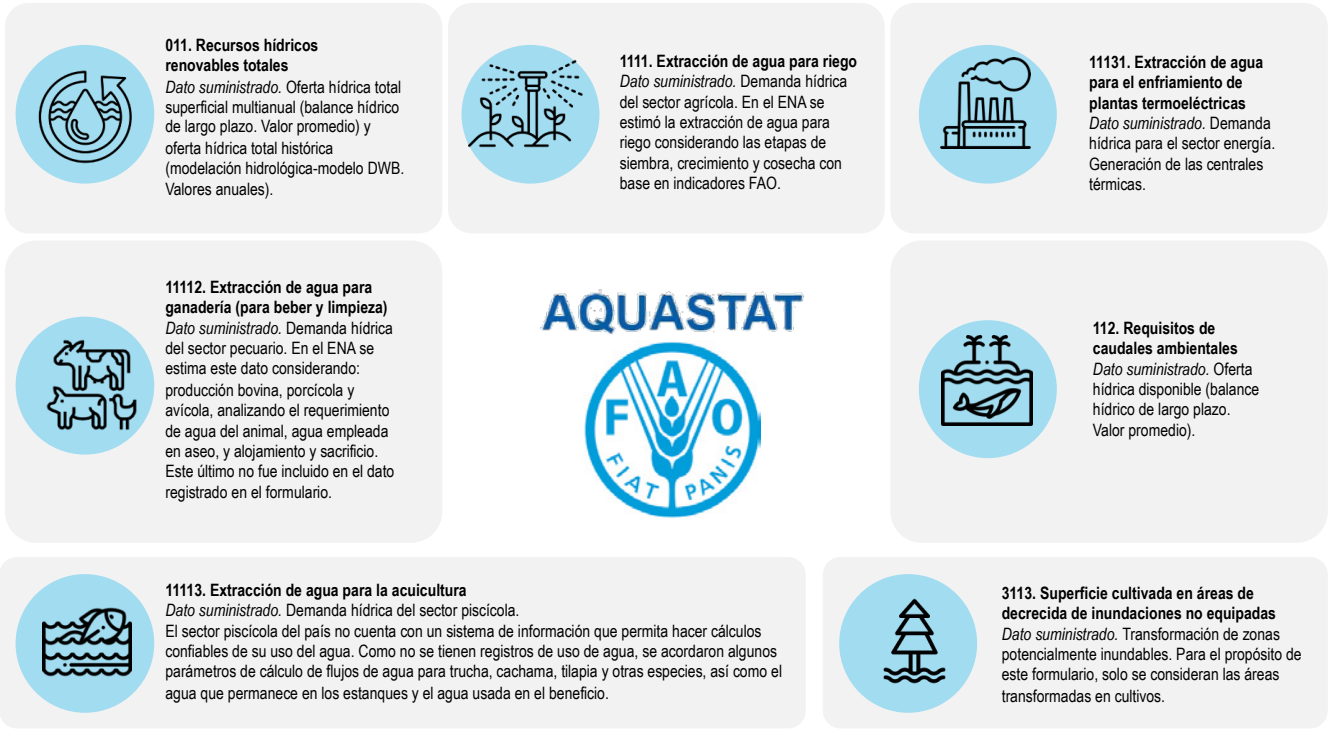



Figura 284. Insumos entregados por el Ideam para el reporte de los indicadores ODS 6.4.1 y 6.4.2.

## 10.1.3 Indicador 6.5.2 - Proporción de la superficie de cuencas transfronterizas sujetas a arreglos operacionales para la cooperación en materia de aguas

Los numerosos cuestionamientos que involucran la disponibilidad del agua, tanto en términos de cantidad como de calidad, requieren que se haga una gestión eficiente de los recursos hídricos soportada en principios de gobernanza. Esto implica que debe existir una sólida articulación interinstitucional que permita que se desarrollen discusiones permanentes para tener una visión integral con objetivos y metas comunes. En este sentido, es importante implementar medidas de gestión no solo dentro del territorio, sino con países fronterizos (ANA, 2019). La meta 6.5 de los ODS tiene como propósito: «De aquí a 2030, implementar la gestión integrada de los recursos hídricos a todos los niveles, incluso mediante la cooperación transfronteriza, según proceda».

Para este fin, se definió el indicador *6.5.2 Proporción de la superficie de cuencas transfronterizas sujetas a arreglos operacionales para la cooperación en materia de aguas*, cuyo organismo custodio es la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UNECE, por su sigla en inglés).

El indicador 6.5.2 de los ODS mide los arreglos operacionales tanto para las cuencas hidrográficas como para los acuíferos. El grado de importancia de las aguas superficiales y subterráneas puede diferir de un estado a otro; por lo tanto, el indicador permite desglosar los datos y evidenciar las necesidades específicas en los niveles nacional, regional y mundial relacionadas con las cuencas y los acuíferos transfronterizos por separado.

El cálculo del valor del indicador se basa en dos elementos principales:

- La cobertura espacial de las zonas de cuencas transfronterizas situadas en un estado,
- La determinación de la medida en que estas zonas están cubiertas por arreglos operacionales de cooperación en materia de agua.

Teniendo en cuenta lo anterior, el Ideam aporta información referente a:

- Cuencas transfronterizas en Colombia.
- Acuíferos transfronterizos en Colombia.
- Acuerdos operacionales en cuencas transfronterizas, datos de calidad y cantidad de agua:

    - Cuencas de los ríos Carchi–Guáitara y Mira–Mataje (Colombia–Ecuador).
    - Cuenca del río Amazonas (Colombia – Ecuador – Perú – Brasil – Venezuela – Bolivia – Guyana – Surinam).

Colombia comparte aguas superficiales con países como Ecuador (río Carchi-Guáitara, ríos Mira-Mataje), Brasil, Bolivia, Ecuador, Guyana, Perú, Suriname y Venezuela (río Amazonas), Panamá (río Juradó) y Venezuela (río Orinoco, Directos al golfo de Maracaibo y región del Catatumbo). En la Figura 4 del capítulo 1, se presentan las subzonas hidrográficas que Colombia comparte con países fronterizos.

En las cuencas Carchí-Guáitara y Mira-Mataje, en el marco de la Comisión de Vecindad e Integración fronteriza Ecuador-Colombia (CVIEC) —mecanismo de diálogo político encargado de promover la integración y el desarrollo de los dos países, establecido el 20 de junio de 1989 y restructurado el 22 de julio de 2011 como mecanismo de diálogo político encargado de promover la integración, la cooperación y el desarrollo de la frontera, con énfasis en la Zona de Integración Fronteriza Ecuador–Colombia (Zifec)—, se establece el Plan Binacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico de las Cuencas Transfronterizas Carchi/Guáitara y Mira/Mataje. El objetivo general de este Plan es:

> […] generar una continuidad en las acciones pertinentes para la gestión integral del recurso hídrico en las cuencas transfronterizas Carchi-Guáitara y Mira-Mataje, con el fin de orientar la ordenación y manejo sostenible de las cuencas, que permitan estrechar los lazos de hermandad y fortalecer la gestión ambiental binacional.

En estas cuencas, se pretende conocer la calidad de las cuencas Carchi, Guáitara, Mira y Mataje a través de dos monitoreos de calidad del agua al año que se intercambian con Ecuador. Se realiza conjuntamente el monitoreo de calidad del agua, el cual está a cargo del Ideam (Colombia) y el INAMHI (Ecuador).

Respecto al río Amazonas, los ocho países de la cuenca suscribieron el Tratado de Cooperación Amazónica (1978) y, posteriormente, crearon la Organización del Tratado de Cooperación Amazónica (OTCA) como plataforma de diálogo político y de cooperación regional. Como parte de este proceso regional, los países miembros aprobaron el Plan estratégico (2004-2012) y después la Agenda Estratégica de Cooperación Amazónica (2011-2018) que establece la visión, la misión y los objetivos estratégicos de la OTCA y define los ejes temáticos y las actividades para la cooperación. En este contexto, se destaca el tema agua con miras a la adopción de un enfoque integrado para la gestión de los recursos hídricos de la cuenca.

*El Proyecto Amazonas: acción regional en el área de recursos hídricos* tiene como objetivo general fortalecer la cooperación técnica entre los países miembros en el campo de la gestión integrada de los recursos hídricos, en especial, en aspectos relacionados con la creación de una red conjunta de monitoreo hidrometeorológico y de calidad de agua de la Cuenca Amazónica. Es una iniciativa de la Agencia Nacional de Aguas de Brasil (ANA/Brasil), de la Agencia Brasileña de Cooperación (ABC), del Departamento de América del Sur (DAS), del Ministerio de Relaciones Exteriores de Brasil (MRE) y de la OTCA para la implementación de acciones de cooperación técnica dirigidas al fortalecimiento de las instituciones responsables de la gestión del agua en los países miembros de la OTCA.

Si bien estos insumos no se generan en el marco del ENA, sí hacen parte de las actividades misionales del Instituto y, por lo tanto, se resalta su aporte para estas iniciativas.

Por otro lado, Colombia comparte aguas subterráneas con países como Panamá, Venezuela, Brasil y Ecuador y, como resultado de una participación como país colaborador en el Programa UNESCO/OEA ISARM Américas, se cuenta con un inventario de cinco acuíferos como: el denominado 1S Chocó-Darién, compartido con Panamá; 3S La Guajira y 2S Táchira-Pamplonita compartidos con Venezuela; 13S Amazonas, compartido con Bolivia, Brasil, Ecuador y Perú; y 10S Tulcán-Ipiales, compartido con Ecuador.

En el territorio nacional, solo se cuenta con información para los acuíferos 3S La Guajira, 2S Táchira-Pamplonita y 13S Amazonas. La Figura 5 del capítulo 1 muestra los sistemas acuíferos que Colombia comparte con países fronterizos.

## 10.2 Consideraciones sobre aportes del Ideam a indicadores ODS 6

Con el propósito de fortalecer el proceso de recopilación de insumos para los indicadores ODS 6 por parte de Colombia, es importante tener en cuenta las siguientes consideraciones:

• La articulación interinstitucional es clave para facilitar el flujo de la información en el reporte de insumos para la iniciativa ODS. Si bien el Ideam ha participado de manera oportuna para el reporte de los indicadores y cuenta con información en la escala nacional que es útil para diferentes metas, es necesario continuar con el fortalecimiento interinstitucional que permita avanzar en los análisis nacionales e involucre los resultados regionales e incluso sectoriales, con el fin de tener resultados con mayor resolución. En este sentido, es importante destacar el fortalecimiento del Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH) con información generada por las autoridades ambientales regionales.

• Es importante avanzar en la automatización y sistematización de los procesos del ENA en las diferentes temáticas. Esto permitirá aumentar la frecuencia de reporte de los indicadores que hacen parte no solo de iniciativas como los ODS, sino de otras que se están adelantando en el orden nacional.

• El fortalecimiento de las capacidades técnicas, tecnológicas y presupuestales permite que haya una mejor generación de datos e información que logre la comparabilidad a nivel internacional de manera estandarizada, que refleje las condiciones del recurso hídrico y muestre el avance de los países en la implementación de los ODS. En este sentido, es necesario fortalecer el monitoreo del recurso hídrico a escalas nacional y regional en términos de cantidad y calidad del agua, tanto para aguas superficiales como subterráneas, de forma que se amplíe la cobertura en el país, y se tenga mayor y mejor información que soporte el conocimiento de la dinámica del agua en Colombia y su comparabilidad con otros países.



Crédito:
Jenny Paola Marín Salazar
Río Chicamocha

# ANÁLISIS INTEGRADO DEL AGUA EN COLOMBIA

**Autores:**

**IDEAM:**
Martha García Herrán
Nelson Omar Vargas Martínez
María Costanza Rosero Mesa
Carolina Vega Viviescas
Jorge Andrés González Rojas
Carlos Albeiro Figueroa Ortiz
Sandra Patricia Salamanca
Juan José Montoya
Luis Eduardo Toro Espitia
Emilio Andrés Gómez García
Claudia Nicol Tetay Botia
Jenny Paola Marín Salazar
Juan Gabriel Osorio Osuna
José Ville Triana

**CTA/GSI/HH:**
Diego Arévalo Uribe
Consuelo Helena Onofre Encinales
Juan Esteban González Valencia

CAPÍTULO 11

# 11. Análisis integrado del agua en Colombia

En este capítulo, se presenta el análisis integrado del agua en Colombia en el marco del modelo básico de evaluación expuesto en el segundo capítulo; es decir, está enfocado en las características de los procesos que se dan en el ciclo del agua, incluida la dinámica de sedimentos. Así mismo, se consideran las presiones relacionadas con procesos de transformación e intervención sobre el medio natural y las afectaciones que se producen en su dominio espacial y temporal.

Se analizan la variabilidad hídrica y las afectaciones a la oferta y a la dinámica de las sequías y de los sedimentos. Así mismo, se examinan los efectos producidos en el agua por intervención antrópica en relación con las presiones por uso y contaminación, y la transformación por actividades productivas de las zonas potencialmente inundables (ZPI). En el tema de riesgo, se evalúa la vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico para la población y para los sectores usuarios del recurso. De esta manera, se categorizan las 316 subzonas hidrográficas según su grado de criticidad.

## 11.1 Esquema metodológico del análisis integrado del agua en Colombia

El análisis integrado se realiza a partir de matrices de decisión que definen rangos de calificación para indicadores que se enmarcan en dos dominios temáticos que permiten una visión general de los diferentes niveles de evaluación del estado, y la dinámica del agua y el recurso hídrico en Colombia. Estos dominios temáticos se ilustran en la Figura 285 y corresponden a:

1. **Variabilidad hídrica y afectación de la oferta.** Este dominio está definido por los indicadores de coeficiente de variación de la oferta hídrica, rendimiento hídrico en condiciones hidrológicas promedio, índice multivariado de sequías (construido con las variables de precipitación, escorrentía y humedad del suelo) con agregación temporal de tres meses y el índice potencial erosión hídrica.
2. **Afectaciones del agua por intervención antrópica.** Considera las presiones por uso (que involucran los indicadores de índice de uso del agua para condición de año seco, transformación de zonas potencialmente inundables y el índice de presión hídrica a los ecosistemas), las presiones por contaminación (definidas por el índice de alteración potencial de la calidad del agua para año seco, y presiones por producción y transformación de coca) y los indicadores de riesgo (considera el índice de vulnerabilidad al abastecimiento hídrico y el índice de desabastecimiento hídrico de la población en los municipios para condiciones hidrológicas extremas).

A continuación, se detallan las característica y el alcance de cada uno de estos componentes, indicadores e índices.

## 11.2 Análisis de variabilidad de la oferta hídrica y dinámica de sequías y sedimentos

En este punto se describen las características de los insumos utilizados en el análisis integrado en relación con el análisis de variabilidad hídrica y afectaciones a la oferta, a partir de los componentes de variabilidad de la oferta hídrica natural (rendimiento hídrico y coeficiente de variación), de la dinámica de los eventos de sequía y de la dinámica de sedimentos por erosión hídrica potencial efectivo de entrega en ladera.

### 11.2.1 Variabilidad de la oferta hídrica

El tema de la oferta hídrica y su variabilidad se desarrolla en el capítulo 3. La oferta hídrica total superficial (OHTS) varía de acuerdo con las características particulares de cada cuenca en relación con condiciones del clima, régimen hidrológico, variabilidad natural, orografía e incidencia de fenómenos macroclimáticos. Para identificar las subzonas con mayor tendencia a cambios, se plantea un indicador que tenga en cuenta tanto las condiciones multianuales como las históricas.

El componente de variabilidad de la oferta hídrica natural en el análisis integrado del agua en Colombia se establece a partir del rendimiento hídrico y del coeficiente de variación. De esta forma, para una con-

## Análisis integrado del agua

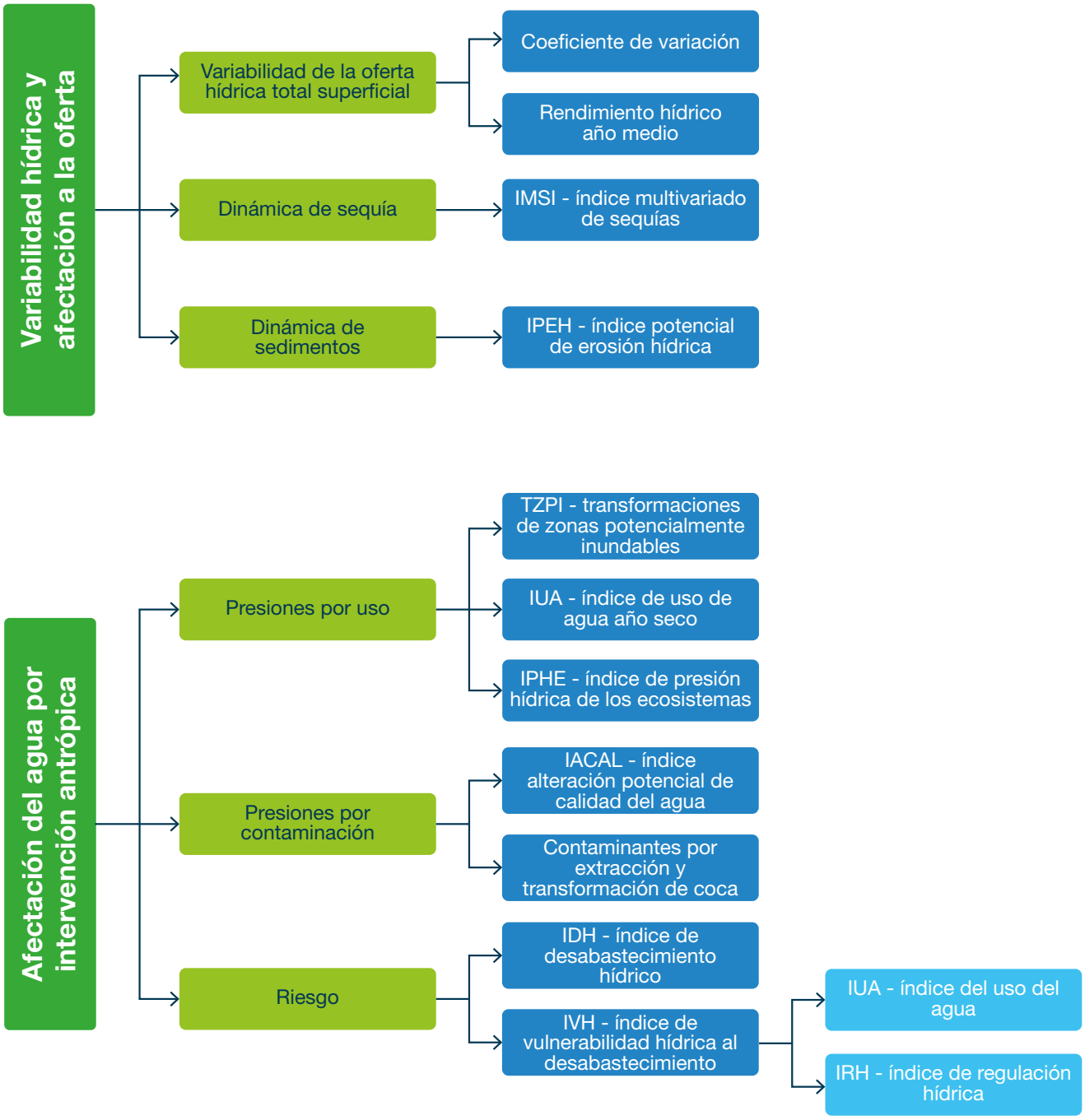



Figura 285. Dominios temáticos, componentes e indicadores del análisis integrado del agua.

dición típica de disponibilidad, en primer lugar, se realiza una categorización del rendimiento hídrico de año medio, proveniente de la OHTS multianual. Seguidamente, se estima el componente de variabilidad natural a partir del cálculo del coeficiente de variación (relación entre la desviación estándar y la media estadística) de la serie anual de escorrentía, acumulada de los resultados de la OHTS histórica.

Estos dos elementos se combinan y así se obtiene una descripción de las condiciones de variabilidad de la oferta hídrica natural por subzona hidrográfica. En este contexto, un rendimiento hídrico muy bajo y un coeficiente de variación muy alto indican una condición de variabilidad más crítica; por el contrario, una subzona con rendimientos muy alto y un coeficiente de variación muy bajo muestra una variabilidad mínima o poco crítica, como se indica en la Tabla 85.

En el **Anexo 4** se presentan los resultados de esta clasificación por subzona hidrográfica, así como su relación con los demás indicadores del estudio.

En la Tabla 86, se relacionan el número de subzonas por categorías y por área hidrográfica, resultado de los estimativos de la viabilidad de la oferta hídrica natural (VOH).

Para condiciones críticas correspondientes con la categoría *muy alta* (rendimientos hídricos muy bajos y coeficiente de variación muy alto), se identifican catorce subzonas hidrográficas, 57 % en el área Magdalena-Cauca y las restantes en el área del Caribe. Más del 90 % de las SZH se encuentran en condiciones desde *moderadas* hasta *muy altas*, representadas en la totalidad de las subzonas del área hidrográfica Magdalena-Cauca (105), en el 90 % (41 subzonas) de las del área Caribe y en 90 % de las del Orinoco.

Tabla 85. Índice de variabilidad de la oferta hídrica natural (VOH).

| Rendimiento hídrico año medio | | Coeficiente de variación de la escorrentía anual histórica | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Mayor de 40 % | 20 % a 40 % | 10 % a 20 % | 5 % a 10 % | Menor de 5 % |
| L/s/km² | Categoría | Muy alta | Alta | Media | Baja | Muy baja |
| Menor de 10 | Muy bajo | Muy alta | Muy alta | Alta | Alta | Media |
| 10 - 20 | Bajo | Alta | Alta | Alta | Media | Media |
| 20 - 50 | Medio | Alta | Alta | Media | Media | Baja |
| 50 - 100 | Alto | Alta | Media | Media | Media | Baja |
| Mayor de 100 | Muy alto | Media | Media | Media | Baja | Muy baja |

Tabla 86. Variabilidad de la oferta hídrica, subzonas por categoría y área hidrográfica.

| VARIABILIDAD DE LA OFERTA HÍDRICA TOTAL SUPERFICIAL (VOH) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| CATEGORIZACIÓN | Número de subzonas por área hidrográfica | | | | | |
| | Amazonas | Caribe | Magdalena - Cauca | Orinoco | Pacífico | Total |
| **Muy alta** | | 6 | 8 | | | **14** |
| **Alta** | 2 | 13 | 39 | 2 | 5 | **61** |
| **Media** | 55 | 22 | 58 | 71 | 27 | **233** |
| **Baja** | | 2 | | | 1 | **3** |
| **Sin información** | | 3 | | | 2 | **5** |
| **Total general** | **57** | **46** | **105** | **73** | **35** | **316** |

### 11.2.2 Dinámica de sequías

La dinámica de sequías está caracterizada por el índice estandarizado multivariado de sequías (IEMS) desarrollado en el capítulo 3, ítem 3.2. De este índice se deriva el índice multivariado de sequías integrado (IMSI) que se utiliza para el análisis integrado.

A nivel del análisis integrado en el ENA, se incorpora dentro del mismo como índice integrado de sequías el correspondiente al índice multivariado integrado con agregación de tres meses (IMSI), pues incluye diferentes variables que describen el comportamiento del ciclo hidrológico y, adicionalmente, el periodo de agregación establecido de tres meses se hace en consideración a la capacidad del índice de caracterizar los eventos ocurridos en una región en particular. El periodo de agregación corresponde a los eventos de incidencia agrícola, primeras afectaciones que se identifican en el territorio tras la ocurrencia de un déficit de precipitación; en este contexto, densifica la identificación de eventos y permite la comparación entre diferentes unidades de análisis espacial en función del índice integrado.

Se utilizan las series generadas para el índice multivariado de sequías (precipitación, escorrentía y humedad del suelo); se calcula la relación entre la suma de las magnitudes de todos los eventos identificados en cada SZH y para la agregación temporal de tres meses (IMSI) y la duración total de estos.

En el análisis integrado, se considera el indicador al nivel de SZH para garantizar el ejercicio de análisis y coherencia espacial con las otras temáticas de información consideradas en este. Los valores obtenidos se clasifican en muy alto, alto, medio, bajo y muy bajo. Los colores usados para las clasificaciones a niveles de mapas y tablas se presentan en la Figura 286.




Figura 286. Clasificación índice multivariado integrado de sequías.

Los clasificados como *muy altos* representan la unidad geográfica de análisis donde ocurren los eventos de mayor impacto y recurrencia, y se muestran en tonos rojos; es decir, con valores negativos más bajos. Por el contrario, áreas con menor número de eventos y duraciones contarán con valores mayores, los cuales se representan con tonos azules. La clasificación se logra a partir del conteo del total de eventos para cada índice y su correspondiente magnitud, de acuerdo con la definición establecida en este capítulo, lo que consolida la información generada a partir de la metodología propuesta.

### 11.2.3 Dinámica de sedimentos

La erosión hídrica potencial se desarrolló en el capítulo sobre dinámica de sedimentos de este estudio. Si bien este indicador está asociado a la erosión hídrica potencial en ladera, da cuenta de zonas susceptibles a la pérdida de suelo por diferentes procesos. Las categorías empleadas en este estudio son las mismas que se usaron en el ENA 2018, donde se generaron cinco categorías de erosión hídrica potencial, desde *muy severa* hasta *sin evidencia*. Por otro lado, la relación de entrega en ladera presenta la probabilidad de que el sedimento producido en una zona llegue al cauce aguas abajo o a una zona de depósito; por ende, da cuenta del material que efectivamente pueda impactar el recurso hídrico. En la Tabla 87, se muestra el cruce de los dos indicadores empleados de la dinámica de sedimentos: erosión hídrica potencial y relación de entrega en ladera, y presenta las cinco categorías para el índice de erosión hídrica potencial efectiva (EHPE).

En el capítulo 5, numeral 5.3, se presenta el análisis integrado de sedimentos por área hidrográfica a partir del rendimiento de sedimentos, la relación de entrega en ladera y la producción de sedimentos estimada con erosión hídrica potencial para cada área hidrográfica.

La Tabla 88 sintetiza el número de SZH por cada una de las categorías y por área hidrográfica.

Tal como se aprecia en la Tabla 88, hay trece subzonas hidrográficas (de las cuales doce se encuentran en el área hidrográfica Magdalena-Cauca) que se ubican en la categoría *muy alta*, por criticidad en condiciones de erosión hídrica potencial y entrega efectiva de sedimentos en ladera. Así mismo, 76 subzonas hidrográficas

alcanzan la categoría de *alta*. De esta manera, el 29 % de las SZH presentan esta condición de criticidad; se destaca que el área hidrográfica Magdalena-Cauca abarca el 21 % de SZH con este nivel de criticidad.

Tabla 87. Erosión hídrica potencial efectiva (EHPE).

| | | | Erosión hídrica potencial ($m^3$/año) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 0 – 2 | 2 - 10 | 10 – 25 | 25 – 100 | >100 |
| | | | Sin evidencia | Ligera | Moderada | Severa | Muy severa |
| Relación de entrega en ladera (adim) | 0 - 0,08 | Muy baja | Muy baja | Baja | Baja | Media | Media |
| | 0,08 - 0,12 | Baja | Baja | Baja | Media | Media | Alta |
| | 0,12 - 0,18 | Media | Baja | Media | Media | Alta | Alta |
| | 0,18 - 0,26 | Alta | Media | Media | Alta | Alta | Muy alta |
| | > 0,26 | Muy alta | Media | Alta | Alta | Muy alta | Muy alta |

Tabla 88. Erosión hídrica potencial efectiva, subzonas por categoría y área hidrográfica.

| EROSIÓN HÍDRICA POTENCIAL EFECTIVA | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| CATEGORIZACIÓN | Número de subzonas por área hidrográfica | | | | | |
| | Amazonas | Caribe | Magdalena - Cauca | Orinoco | Pacífico | Total |
| **Muy alta** | | | 12 | | 1 | **13** |
| **Alta** | 2 | 8 | 44 | 15 | 9 | **78** |
| **Media** | 3 | 20 | 42 | 7 | 5 | **77** |
| **Baja** | 8 | 12 | 7 | 17 | 16 | **60** |
| **Muy baja** | 44 | 3 | | 34 | 2 | **83** |
| **Sin información** | | 3 | | | 2 | **5** |
| **Total general** | **57** | **46** | **105** | **73** | **35** | **316** |

## 11.3 Análisis de afectaciones al agua por intervención antrópica

En este aparte, se describen los componentes e indicadores del análisis integrado asociado con las afectaciones al agua por intervención antrópica. En este sentido, se consideran las presiones por uso, presiones por contaminación y condicionantes de riesgo por desabastecimiento hídrico.

### 11.3.1 Presiones por uso

Este componente de presión por uso está determinado por el índice de uso de agua, la transformación de zonas potencialmente inundables y el índice de presión hídrica a los ecosistemas.

#### Índice de uso de agua (IUA)

Este indicador, que relaciona la demanda hídrica multisectorial en un periodo de tiempo y la oferta hídrica superficial disponible para ese mismo periodo, se estima a nivel de SZH para condiciones hidrológicas medias y secas. Los rangos de evaluación, los resultados y los análisis correspondientes se presentan en el capítulo 7. En este ítem, se ilustran los resultados espacializados (Figura 287) para estas dos condiciones hidrológicas.

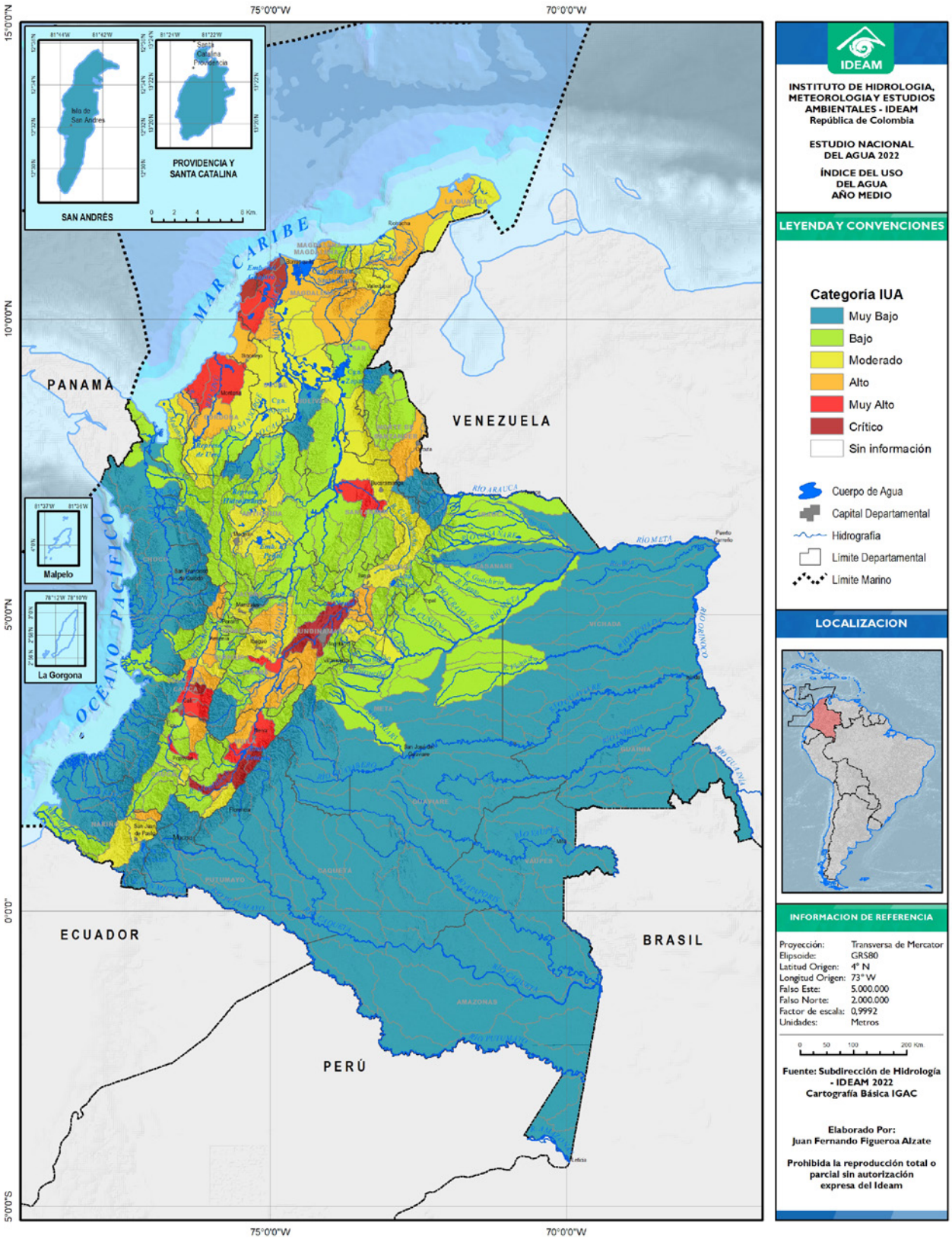



Figura 287. Índice de uso de agua para condiciones hidrológicas promedio y extremas de año seco.

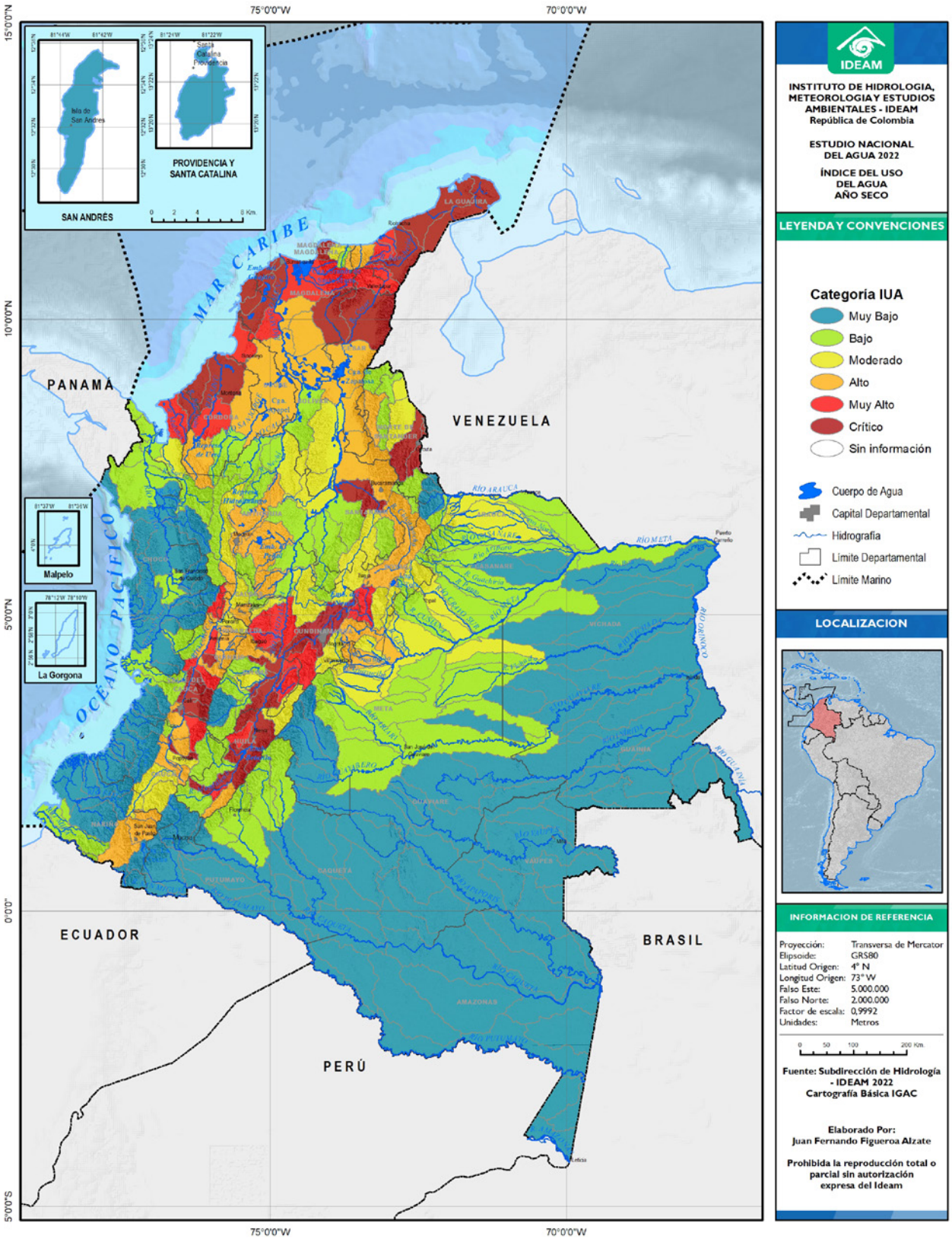



Figura 287. Índice de uso de agua para condiciones hidrológicas promedio y extremas de año seco.

En la Tabla 89, se presentan los rangos de evaluación del IUA que, bajo una convención de colores y rangos de valor, representan la situación estimada para el indicador, resaltando las SZH en estado *crítico*, *muy alto* y *alto*.

Tabla 89. Rangos de evaluación IUA.

| Rango IUA | Categoría |
|---|---|
| IUA < 1 | Muy bajo |
| 1 < IUA < 10 | Bajo |
| 10 < IUA < 20 | Moderado |
| 20 < IUA < 50 | Alto |
| 50 < IUA < 100 | Muy alto |
| IUA > 100 | Crítico |

Para efectos del análisis integrado, se utiliza la condición hidrológica de año seco, puesto que es la que refleja la mayor criticidad en las presiones por uso.

En la Tabla 90, se relaciona el número de subzonas por categoría y por área hidrográfica, resultado de los estimativos para el IUA en condiciones hidrológicas de año medio y seco. Para la isla de San Andrés, aunque se tienen presiones altas por el uso del recurso, la oferta hídrica se asocia con la disponibilidad de agua subterránea que, a la fecha, satisface las necesidades de la isla. Providencia se abastece de agua superficial y no cuenta con sistemas acuíferos asociados debido a su naturaleza volcánica. En las islas del Pacífico no se cuenta con información.

Con los resultados para este índice, en condiciones hidrológicas promedio se identifican 53 subzonas con altas presiones por uso en relación con la oferta hídrica disponible, las cuales se concentran en las áreas hidrográficas Magdalena-Cauca y Caribe, con 57 % y 21 %, respectivamente. El número de subzonas con baja capacidad para sostener los volúmenes de agua que demandan los usuarios del recurso (IUA) se incrementa en 43 (total de 96) cuando las condiciones hidrológicas corresponden a un año seco. En el capítulo 7 (Usos del agua en Colombia), se realizan análisis detallados y comparativos de las subzonas que tienen niveles altos de presión cuando se presentan condiciones hidrológicas promedio o secas.

En relación con el comportamiento del índice de uso del agua en 2022 frente a los estimativos en 2018, se observan ligeros cambios que obedecen: por un

Tabla 90. Índice de uso de agua, subzonas por categoría y área hidrográfica.

| ÍNDICE DEL USO DEL AGUA | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CATEGORIZACIÓN | Número de subzonas por área hidrográfica | | | | | | | | | | | |
| | Amazonas | | Caribe | | Magdalena - Cauca | | Orinoco | | Pacífico | | Total | |
| | Año medio | Año seco | Año medio | Año seco | Año medio | Año seco | Año medio | Año seco | Año medio | Año seco | Año medio | Año seco |
| **Crítica** | | | 1 | 10 | 8 | 28 | | | | | **9** | **38** |
| **Muy alta** | | | 2 | 5 | 12 | 15 | | 1 | | | **14** | **21** |
| **Alta** | | | 8 | 3 | 20 | 24 | 1 | 5 | 1 | 3 | **30** | **35** |
| **Moderada** | | | 6 | 4 | 17 | 12 | 2 | 13 | 2 | 2 | **27** | **31** |
| **Baja** | | 4 | 12 | 12 | 43 | 25 | 27 | 24 | 7 | 7 | **89** | **72** |
| **Muy baja** | 57 | 53 | 17 | 12 | 5 | 1 | 43 | 30 | 23 | 21 | **145** | **117** |
| **Sin información** | | | | | | | | | 2 | 2 | **2** | **2** |
| **Total general** | **57** | **57** | **46** | **46** | **105** | **105** | **73** | **73** | **35** | **35** | **316** | **316** |

lado, a la disminusión de la demanda como está identificado en el capítulo 7; y del otro, al ajuste de la zonificación hidrográfica con cartografía de mayor resolución que se refleja en cambios de algunas áreas en las subzonas hidrográficas. En términos generales, no se observan cambios sustanciales en el número de subzonas hidrográficas para las diferentes categorías.

## Transformación de zonas potencialmente inundables (TZPI)

Los procesos de transformación al interior de las zonas potencialmente inundables —debido ante todo a la intervención antrópica no controlada y ajena a principios básicos de ordenamiento ambiental que deben propender por la protección de los espacios del río, zonas de protección de humedales y la salud de los ecosistemas en general— ha conllevado al incorrecto aprovechamiento del gran potencial inherente a los servicios ecosistémicos presentes en estas áreas.

El Estudio Nacional del Agua (Ideam, 2019) definió diferentes categorías (Tabla 91), las cuales clasifican el grado de intervención antrópica dentro de las zonas potencialmente inundables.

Tabla 91. Categorías de porcentaje de transformación de zonas potencialmente inundables.

| Rango (% transformación ZPI) | Categoría |
|---|---|
| 0 – 5 | Muy bajo |
| 5 – 10 | Bajo |
| 10 – 15 | Medio |
| 15 – 50 | Alto |
| >50 | Muy alto |

Estas cinco categorías, que van desde *muy bajo* hasta *muy alto*, definen el porcentaje de área intervenida por actividad antrópica existente en las zonas potencialmente inundables dentro de cada subzona hidrográfica. Los resultados y análisis de las transformaciones de estas ZPI se presentan por SZH en el capítulo 3, ítem 3.3.

## Índice de presión hídrica a los ecosistemas (IPHE)

Este índice relaciona la huella hídrica verde generada por el sector agropecuario y forestal —presente en una unidad espacial de análisis, como la subzona hidrográfica, en un periodo de tiempo— y la disponibilidad de agua verde para ese mismo periodo de tiempo. A través de este índice, se identifica en qué cuencas se presenta competencia por agua verde asociada a competencia por uso del suelo entre las actividades existentes, específicamente del sector agropecuario, y las zonas de protección de ecosistemas estratégicos requeridas para la provisión y mantenimiento de servicios ecosistémicos en las cuencas. Los estimativos y los análisis correspondientes se presentan en el capítulo 7.

Los resultados de este índice se incluyen como uno de los factores de análisis integrado en relación con las afectaciones por intervención antrópica. Se han establecido seis categorías de valores que permiten estimar el estado del índice en cada una de las subzonas hidrográficas a nivel nacional desde *muy bajo* hasta *crítico*.

En la Tabla 92, se registra la relación entre valores y calificación para el indicador.

Tabla 92. Rangos de evaluación IPHE.

| IPHE Huella hídrica verde / disponibilidad agua verde | |
|---|---|
| **Categoría** | **Rangos** |
| Crítica | >1,0 |
| Muy alta | 0,8 - 1,0 |
| Alta | 0,5 - 0,8 |
| Moderada | 0,3 - 0,5 |
| Baja | 0,1 - 0,3 |
| Muy baja | <0,1 |

En la Figura 288, se presenta el mapa con la distribución del estado de IPHE para todas la SZH en Colombia, evaluado el índice para una condición de año seco en la oferta disponible.

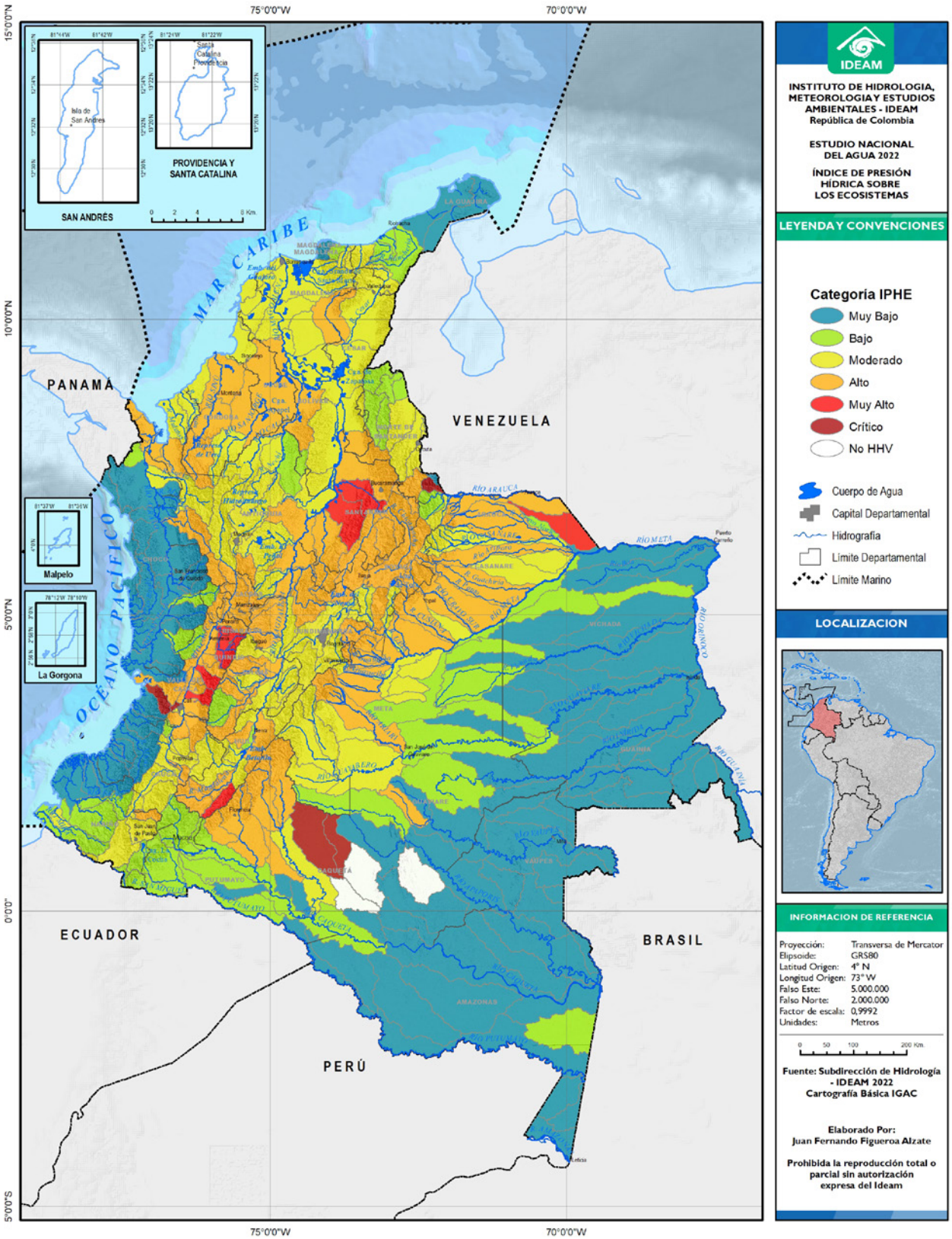



Figura 288. Índice de presión hídrica a los ecosistemas.

En la Tabla 93, se relacionan el número de subzonas hidrográficas por categoría y por área hidrográfica, resultado de los estimativos para el IPHE.

Los valores *críticos* se presentan en cinco SZH, de las cuales hay dos que están en el área hidrográfica del río Amazonas. De las 94 subzonas con competencia por agua verde (categorías *muy alta* y *alta* de este índice), el 61 % pertenecen al área hidrográfica Magdalena-Cauca y el 22 % a la del río Orinoco. Las áreas hidrográficas con el mayor número de SZH con valores *bajos* y *muy bajos* están asociadas con las cuencas del Amazonas, Orinoco y Pacífico, con 35 %, 24 % y 19 % del total (140 SZH), respectivamente, lo cual indica situación favorable para ecosistemas estratégicos de estas subzonas.

Tabla 93. Índice de presión hídrica sobre los ecosistemas, subzonas por categoría y área hidrográfica.

| ÍNDICE DE PRESIÓN HÍDRICA SOBRE LOS ECOSISTEMAS (IPHE) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| CATEGORIZACIÓN | Número de subzonas por área hidrográfica | | | | | |
| | Amazonas | Caribe | Magdalena - Cauca | Orinoco | Pacífico | Total |
| **Crítica** | 2 | | 1 | 1 | 1 | **5** |
| **Muy alta** | | | 6 | 1 | | **7** |
| **Alta** | 6 | 8 | 51 | 20 | 2 | **87** |
| **Moderada** | 1 | 11 | 43 | 17 | 6 | **78** |
| **Baja** | 9 | 10 | 4 | 11 | 6 | **40** |
| **Muy baja** | 35 | 14 | | 22 | 18 | **89** |
| **Sin información** | 4 | 3 | | 1 | 2 | **10** |
| **Total general** | **57** | **46** | **105** | **73** | **35** | **316** |

## 11.3.2 Presiones por contaminación

Las presiones por contaminación en esta versión del ENA corresponden, por una parte, a las presiones por cargas contaminantes ejercidas sobre los sistemas hídricos; y por otra, a la presión que generan cargas químicas asociadas a la producción y transformación de coca.

### Índice de alteración potencial de la calidad del agua (IACAL)

El *índice de alteración potencial de calidad de agua* (IACAL) permite evaluar las presiones por carga contaminante que se ejercen sobre los sistemas hídricos por vertimientos de aguas residuales de los sectores doméstico, industria y beneficio del café. El análisis de los resultados de este índice de presión para condiciones hidrológicas medias y de año seco se presentan en el capítulo 8.

Los resultados del IACAL, actualizado para condiciones hidrológicas de año seco, constituyen uno de los factores del análisis integrado por SZH. Su espacialización se presenta en el mismo capítulo 8. Las categorías del índice son las mismas utilizadas en los anteriores ENA. En la Tabla 94, se muestran los rangos de calificación.

Tabla 94. Categorías del índice de alteración potencial de la calidad del agua.

| IACAL | |
|---|---|
| Categoría | Valor |
| Muy alta | 5 |
| Alta | 4 |
| Media alta | 3 |
| Moderada | 2 |
| Baja | 1 |

La Tabla 95 sintetiza las subzonas hidrográficas por categoría de presión por contaminación que representa el IACAL en cada una de las cinco áreas hidrográficas de Colombia.

El índice de alteración potencial de la calidad del agua refleja la presión de carga contaminante sobre la calidad del agua teniendo en cuenta las condiciones hidrológicas promedio (oferta hídrica superficial) y extremas de año seco.

Con los resultados obtenidos para este índice —en condiciones hidrológicas extremas de año seco—, se identifica que las más altas presiones se concentran en 55 SZH, de las cuales el 73 % se encuentran en el área hidrográfica Magdalena-Cauca y el 20 % están en el Caribe. De igual manera, de las 27 SZH que en condiciones de año medio tienen una categoría de presión muy alta, el AH Magdalena-Cauca concentra el 70 %; y el resto (30 %), el área hidrográfica del Caribe. Ya en la categorización *alta*, en condiciones hidrológicas extremas de año seco y en condiciones de año medio, la única área hidrográfica que no cuenta con SZH con estas presiones sobre la calidad del agua es la del Amazonas.

Tabla 95. Índice de alteración potencial de la calidad de agua, subzonas por categoría y área hidrográfica.

| ÍNDICE DE ALTERACIÓN POTENCIAL DE LA CALIDAD DEL AGUA (IACAL) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CATEGORIZACIÓN | Número de subzonas por área hidrográfica | | | | | | | | | | | |
| | Amazonas | | Caribe | | Magdalena - Cauca | | Orinoco | | Pacífico | | Total | |
| | Año medio | Año seco | Año medio | Año seco | Año medio | Año seco | Año medio | Año seco | Año medio | Año seco | Año medio | Año seco |
| **Muy alta** | | | 8 | 12 | 19 | 40 | | 2 | | 1 | **27** | **55** |
| **Alta** | | | 6 | 7 | 35 | 31 | 2 | 2 | 4 | 5 | **47** | **45** |
| **Media alta** | | | 4 | 5 | 18 | 23 | 2 | 9 | 2 | 2 | **26** | **39** |
| **Moderada** | 1 | 5 | 5 | 8 | 24 | 10 | 8 | 9 | 3 | 7 | **41** | **39** |
| **Baja** | 56 | 52 | 22 | 13 | 9 | 1 | 61 | 51 | 24 | 18 | **172** | **135** |
| **Sin información** | | | 1 | 1 | | | | | 2 | 2 | **3** | **3** |
| **Total general** | **57** | **57** | **46** | **46** | **105** | **105** | **73** | **73** | **35** | **35** | **316** | **316** |

## Presión por uso de sustancias químicas para producción y transformación de coca

En el análisis de presiones por contaminación debido al uso de sustancias químicas para producción y transformación de coca, se consideraron las mismas categorías que en el ENA 2018 (Ideam, 2019, p. 299). La calificación de presión asociada al uso de sustancias químicas para estos procesos se consolidó con los datos generados por el proyecto Sistema Integrado de Monitoreo de Cultivos Ilícitos (SIMCI) para el 2020. Para definir las categorías de presión sobre la calidad del agua, se toma como sustancia base de referencia el ácido sulfúrico al 10 % (litros), que define los rangos de presión *muy alta*, *media* y *baja* en subzonas donde hay presencia de estos cultivos.

Como estimativo de la presión a nivel de las subzonas hidrográficas, también se tomó como referente

base el ácido sulfúrico al 10 % (litros), el cual se encuentra en 149 subzonas hidrográficas, al igual que las otras sustancias reportadas en el capítulo 8. Para la categorización se realizó una distribución teniendo en cuenta el uso reportado por el SIMCI, como se muestra en la Tabla 96.

Tabla 96. Categorías de presión por uso de sustancias químicas en producción y transformación de coca.

| Rango ácido sulfúrico al 10 % (litros) | Categoría |
|---|---|
| ≥ 80.000 | Muy alta |
| ≥ 10.000 y < 80.000 | Medio |
| < 10.000 | Baja |

### 11.3.3 Elementos de riesgo asociados al desabastecimiento hídrico

En relación con los riegos asociados al desabastecimiento hídrico, se consideran los índices de vulnerabilidad al desabastecimiento y los correspondientes a la recurrencia de eventos a nivel municipal, tanto por temporada seca como de lluvia.

#### Índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento (IVH)

El *índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento* (IVH) relaciona de forma cualitativa los resultados del *índice del uso del agua* (IUA) y el *índice de retención y regulación hídrica* (IRH), de forma que representa la fragilidad que tienen los sistemas hídricos superficiales de mantener la oferta de agua dadas sus condiciones de uso y regulación; y de esta manera identifica la vulnerabilidad en el abastecimiento de agua que presentan los sectores usuarios del recurso. Es importante resaltar que, entre más alto es el uso del agua y menor la capacidad de regulación, la vulnerabilidad por desabastecimiento aumenta. Este índice es evaluado tanto para condiciones hidrológicas de año medio como de año seco; sus resultados se presentan por subzona hidrográfica para ambas condiciones mencionadas en el **Anexo 2.**

En la Figura 289, se presenta la distribución del índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento en las 316 subzonas del territorio colombiano para condiciones hidrológicas de año medio y año seco.

En estos mapas se pueden observar las subzonas que tienen una alta fragilidad para mantener la oferta hídrica, lo que implica alto potencial de riesgo de desabastecimiento para usuarios del recurso.

En un año promedio, 46 subzonas hidrográficas del país presentan una categorización *alta* o *muy alta* del IVH, de las cuales el 22 % muestran la mayor categoría, es decir, cuentan con muy altas presiones por uso con respecto a la oferta disponible, y su capacidad de regulación y retención hídrica es muy baja.

En un escenario de año seco, el grado de afectación aumenta. Se identifican 81 subzonas del país con categorización *alta* o *muy alta* del IVH, dentro de las cuales el 48 % (39) presentan una categoría muy *alta*, indicando la mayor fragilidad a sufrir condiciones de desabastecimiento hídrico considerando el uso y la regulación del agua.

La Tabla 97 relaciona, en cada una de las cinco áreas hidrográficas, la categorización de las subzonas hidrográficas de acuerdo con los resultados obtenidos del IVH para condición hidrológica de año medio y año seco.

Las mayores afectaciones se encuentran en las áreas hidrográficas Caribe y Magdalena–Cauca, donde se destacan las subzonas Arroyos directos al Caribe; Directos Caribe-Ay. Sharimahana Alta Guajira; Ríos directos al Magdalena (mi); Ríos directos al Magdalena (md); Río Neiva; Río Bogotá; Ríos Lilí, Meléndez y Cañaveralejo; Ríos Guabas, Zabaletas y Sonso; Directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura, y Ciénaga Mallorquín. Estas subzonas hidrográficas presentan una categorización *muy alta* del IVH, tanto para condiciones hidrológicas promedio como para las extremas de año seco.

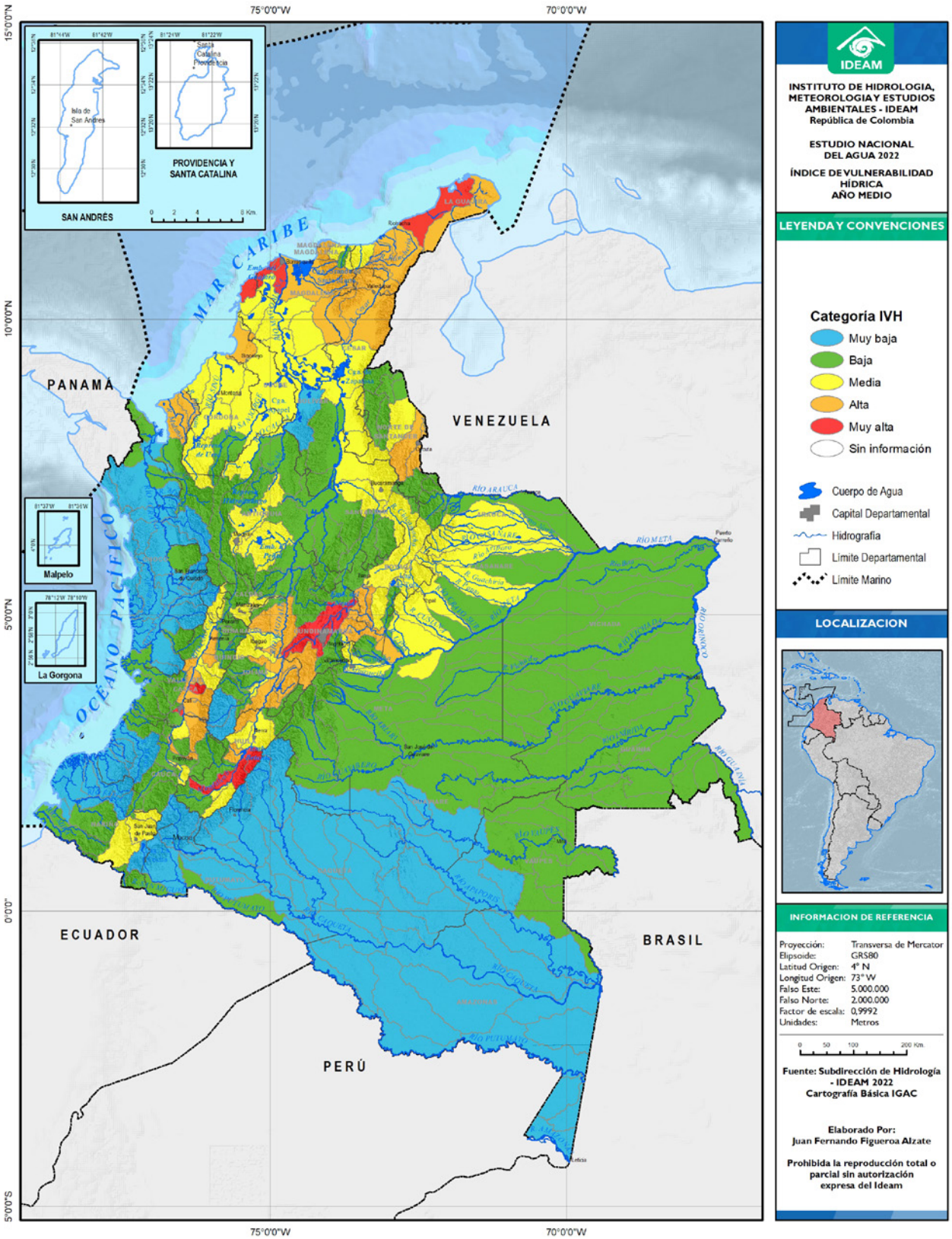



Figura 289. Índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento para condiciones hidrológicas promedio y de año seco.

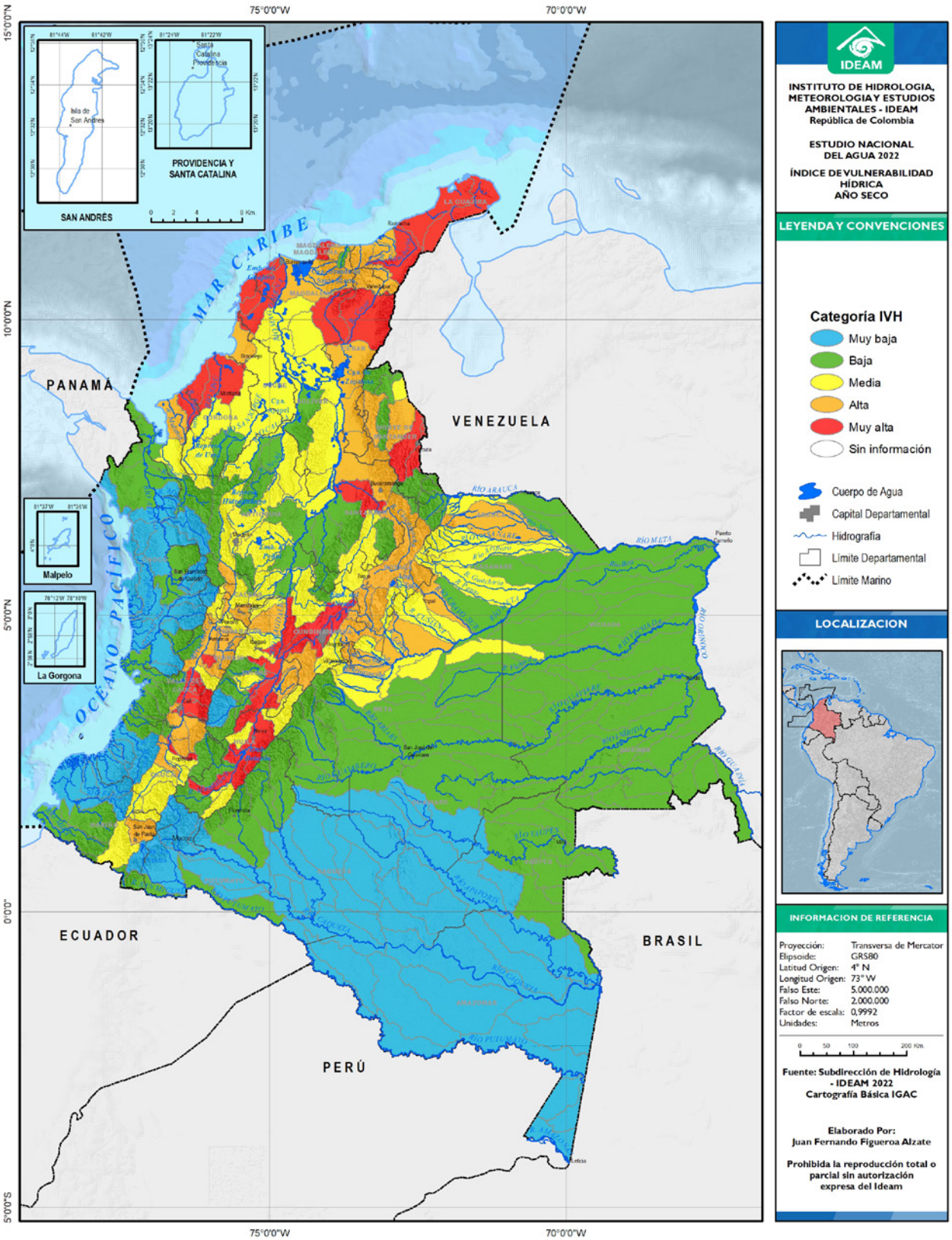



Figura 289. Índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento para condiciones hidrológicas promedio y de año seco.

Tabla 97. Índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento, subzonas por categoría y por área hidrográfica.

| ÍNDICE DE VULNERABILIDAD HÍDRICA POR DESABASTECIMIENTO (IVH) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CATEGORIZACIÓN | Número de subzonas por área hidrográfica | | | | | | | | | | | |
| | Amazonas | | Caribe | | Magdalena - Cauca | | Orinoco | | Pacífico | | Total | |
| | Año medio | Año seco | Año medio | Año seco | Año medio | Año seco | Año medio | Año seco | Año medio | Año seco | Año medio | Año seco |
| **Muy alta** | | | 2 | 10 | 8 | 29 | | | | | **10** | **39** |
| **Alta** | | | 10 | 8 | 23 | 22 | 3 | 11 | | 1 | **36** | **42** |
| **Media** | | | 7 | 4 | 31 | 30 | 12 | 13 | 3 | 4 | **53** | **51** |
| **Baja** | 17 | 21 | 12 | 13 | 40 | 23 | 58 | 49 | 12 | 11 | **139** | **117** |
| **Muy baja** | 40 | 36 | 12 | 8 | 3 | 1 | | | 18 | 17 | **73** | **62** |
| **Sin información** | | | 3 | 3 | | | | | 2 | 2 | **5** | **5** |
| **Total general** | **57** | **57** | **46** | **46** | **105** | **105** | **73** | **73** | **35** | **35** | **316** | **316** |

## Índice de afectación al abastecimiento hídrico municipal en condiciones hidroclimáticas extremas

En esta versión del Estudio Nacional del Agua, en el análisis integrado se considera el índice de afectación por desabastecimiento hídrico, tomando como referencia los consolidados de los municipios que presentaron afectación en sus sistemas de abastecimiento, tanto por temporada seca como por temporada de lluvia, en el período 2017-2021. El total de municipios afectados en el país para este período fue de 433, teniendo en cuenta ambas temporadas, las cuales se evalúan en el capítulo 9: «Susceptibilidad al desabastecimiento hídrico en municipios». Para este grupo de municipios, se analizó el área afectada y la recurrencia de los eventos por desabastecimiento. Se establecieron cuatro categorías: *muy alto*, *alto*, *medio* y *bajo* que representan el grado de afectación de los municipios del país tomando en consideración los análisis realizados de la siguiente manera:

*Muy alto*: corresponde a los 28 municipios del país que han presentado afectación por desabastecimiento hídrico tanto en temporada seca como en temporada de lluvia, relacionados en el capítulo 9.

Las categorizaciones *alta*, *media* y *baja* se esquematizan en la Tabla 98, y son definidas en función de la recurrencia (alta, media o baja) y el área afectada (urbana, rural o mixta). Además, se muestra el color asignado para indicar el grado de afectación de los municipios.

*Alta*: en esta categoría se agrupan los municipios cuya área de afectación es mixta (urbana y rural) con recurrencia alta o media y el área urbana con recurrencia alta.

*Media*: hace referencia a los municipios que han presentado afectaciones en el área mixta (urbana y rural) con recurrencia baja; urbana con recurrencia media y baja; y rural con recurrencia alta y media.

*Baja*: en esta última categoría se incluyen los municipios que únicamente han presentado afectación en su área rural y, además, la recurrencia es baja.

Por último, con el propósito de poder integrar los resultados en las mismas unidades de análisis de los demás componentes del Estudio, se realiza el cruce entre los municipios con afectación y las subzonas hidrográficas para identificar a qué subzonas pertenecen los municipios afectados por desabastecimiento.

Tabla 98. Categorías para el análisis integrado según el índice de afectación por desabastecimiento hídrico.

| Recurrencia | Área afectada | | |
|---|---|---|---|
| | Mixta | Urbana | Rural |
| Alta | | | |
| Media | | | |
| Baja | | | |

## 11.4 Análisis integrado del agua por subzona hidrográfica

Con los índices y las variables presentadas al inicio de este capítulo, junto con la consolidación de los elementos referenciados anteriormente, se realiza la evaluación integrada del agua para Colombia, por área y por subzona hidrográfica.

El propósito de esta evaluación es identificar las SZH con mayor grado de criticidad. La evaluación por subzona hidrográfica se hace a partir de once índices e indicadores que satisfacen los seis grandes componentes temáticos, los que a su vez responden a dos dominios explicados en la parte inicial de este capítulo. Los seis grandes componentes temáticos son:

1. Variabilidad de la oferta hídrica natural.
2. Dinámica de sequías.
3. Dinámica de sedimentos.
4. Presiones por uso.
5. Presiones por contaminación.
6. Elementos de riesgo asociados al desabastecimiento hídrico.

Con estos índices e indicadores —coeficiente de variación, rendimiento hídrico, índice multivariado de sequías, índice de erosión hídrica potencial efectiva, índice de uso del agua, transformación de zonas potencialmente inundables, índice de presión hídrica a los ecosistemas, índice de alteración potencial de la calidad del agua, uso de sustancias químicas para la producción y transformación de coca, índice de vulnerabilidad hídrica e índice de desabastecimiento hídrico municipal— se construye un algoritmo soportado en matrices de decisión y un panel de expertos que al final ponderan cada una de las variables. A continuación, se presenta el algoritmo de análisis integrado y sus variables correspondientes.

$$AI = 0{,}2*P1+0{,}2*P2+0{,}1*P3+0{,}18*P4+0{,}02*P5 \\ +0{,}05*P6 +0.1*P7+0.1*P8+0.05*P9$$

- VOH -Ex (P1): variabilidad de la oferta hídrica total superficial.
- VRH-Ex (P2): variabilidad del recurso hídrico en condiciones extremas a partir de las presiones sobre la oferta hídrica natural, condición hidrológica de año seco (IUA) y variabilidad de esta oferta natural en esta condición extrema.
- IPHE (P3): índice de presión hídrica sobre los ecosistemas.
- IACAL (P4): índice de alteración potencial de la calidad de agua, condiciones de oferta hídrica año seco.
- (P5): uso de sustancias químicas para la producción y transformación de coca.
- EHPE (P6): erosión hídrica potencial en ladera de sedimentos.
- (P7): porcentaje de transformación de zonas potencialmente inundables.
- IMS (P8): índice multivariado de sequía, agregado a tres meses.
- IACE (P9): índice de afectación al abastecimiento hídrico por condiciones hidroclimáticas extremas.

La ponderación de los factores P1 a P9 se realizó con base en los resultados temáticos, análisis de escenarios de prueba con panel de expertos y definición de categorías basado en percentiles. Esta ecuación se aplica a cada una de las SZH.

Para la construcción del análisis integrado, se evaluaron diferentes escenarios que llevaron a discusiones y análisis técnicos con respecto a la ponderación y categorización, teniendo en cuenta los resultados de cada uno de los indicadores y el conocimiento temático. Esto permitió definir la metodología del análisis y establecer las categorías para ajustar la fórmula propuesta para el análisis integrado. Sin embargo, se observaron variaciones importantes en la sumatoria de la ponderación por subzona hidrográfica, probablemente debido a la inclusión de nuevos

indicadores en el análisis. En ese sentido, fue necesario recurrir al uso de percentiles, con el propósito de contar con una medida que permitiera establecer rangos en los cuales los valores fluctúen y así tener un punto de comparación con respecto al anterior estudio.

En la evaluación integrada del agua, se realizó un análisis a partir de los percentiles 22,5; 45; 67,5 y 90, con los cuales se definen las cinco categorías del modelo, como se observa en la Tabla 99, y la categorización por subzona hidrográfica.

Tabla 99. Categorías para el análisis integrado de subzonas hidrográficas y priorización por afectación al agua.

| Modelo integrado | |
|---|---|
| **Categoría** | **Rango** |
| Muy alta | ≥3,52 |
| Alta | ≥2,98 y <3,52 |
| Media | ≥2,41 y <2,98 |
| Baja | ≥1,79 y <2,41 |
| Muy baja | <1,79 |

Con esta aproximación y las categorías que se muestran en la Tabla 99 se obtienen los resultados finales del análisis integrado del agua por subzona hidrográfica.

Los resultados de la evaluación integrada para cada subzona hidrográfica y su categoría para una condición hidrológica extrema se presentan en el **Anexo 4.**

El mapa de la Figura 290 muestra los resultados de la evaluación integrada e ilustra sobre las subzonas con diferentes grados de criticidad.

En la Tabla 100, se relacionan las subzonas por categoría de análisis integrando según área hidrográfica.

Para condiciones hidrológicas extremas se identifican 103 subzonas hidrográficas en las que la evaluación integrada de los factores de variabilidad y afectación por intervención antrópica tienen las condiciones más críticas, con grados *muy alto* y *alto*. De estas, el 87 % se encuentra en las áreas hidrográficas del Caribe y Magdalena–Cauca, con 21 y 69 subzonas hidrográficas, respectivamente. En las siguientes tablas, se relacionan las subzonas con categoría de análisis integrado *muy alta* y *alta* (Tabla 101 y Tabla 102).

De esta manera se cuenta con una herramienta de análisis integral que permite reconocer las subzonas hidrográficas donde se concentra la problemática del agua asociada a la variabilidad hídrica y afectación a la oferta, y la afectación del agua por intervención antrópica. Como era de esperarse, el mayor peso específico recae sobre la cuenca Magdalena-Cauca en las dos últimas tablas presentadas.

Tabla 100. Análisis integrado, subzonas por área hidrográfica y categoría de análisis.

| Análisis integrado | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Categoría del análisis integrado** | **Número de subzonas por área hidrográfica** | | | | | |
| | **Amazonas** | **Caribe** | **Magdalena - Cauca** | **Orinoco** | **Pacífico** | **Total** |
| **Muy alta** | | 9 | 19 | 1 | 3 | **32** |
| **Alta** | | 12 | 50 | 7 | 2 | **71** |
| **Media** | 6 | 9 | 33 | 19 | 3 | **70** |
| **Baja** | 15 | 7 | 3 | 22 | 24 | **71** |
| **Muy baja** | 36 | 9 | | 24 | 3 | **72** |
| **Total general** | **57** | **46** | **105** | **73** | **35** | **316** |

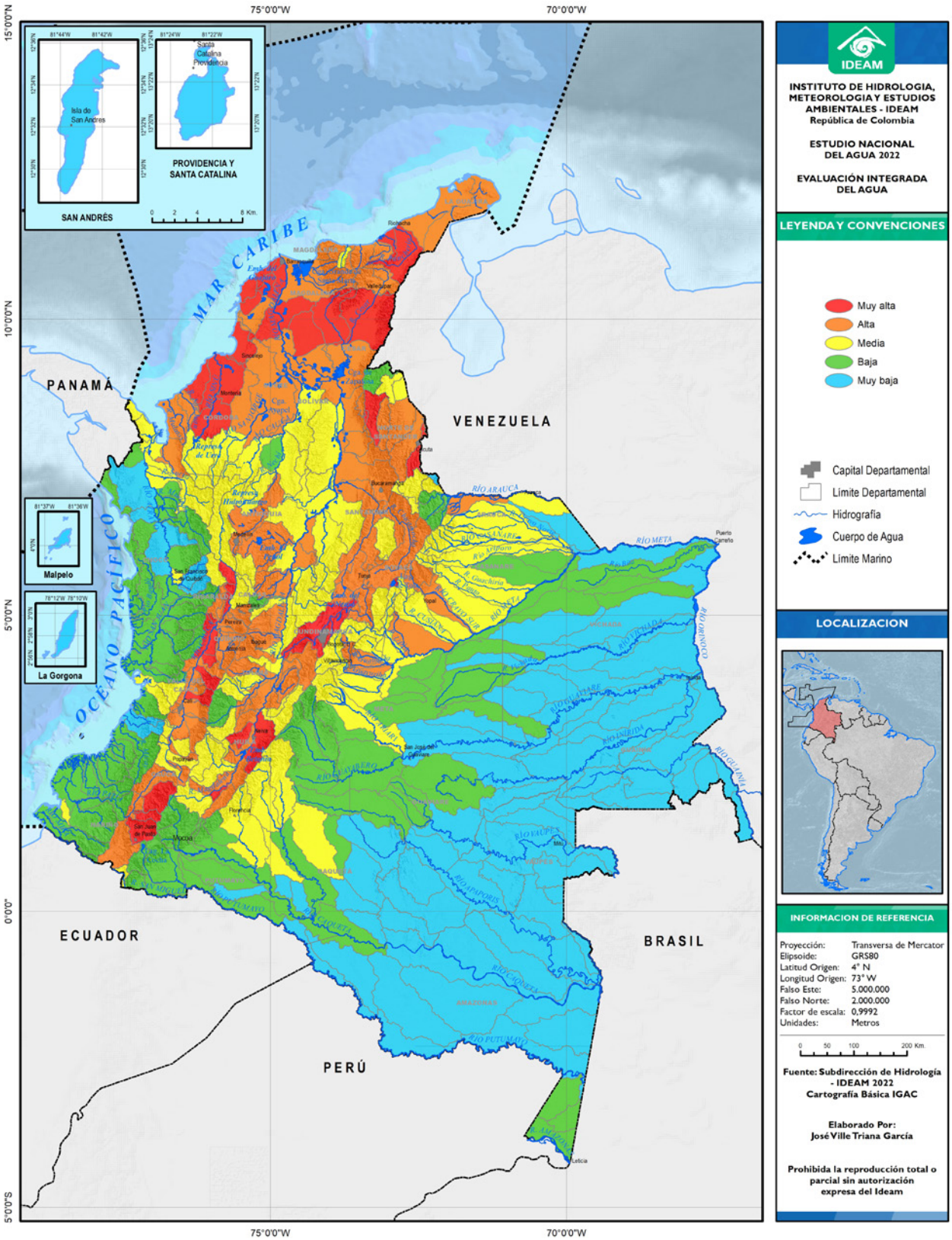



Figura 290. Evaluación integrada del agua por subzona hidrográfica.

Tabla 101. Subzonas hidrográficas en categoría *muy alta* en condiciones hidrológicas extremas de año seco.

| CATEGORÍA MUY ALTA DEL ANÁLISIS INTEGRADO | | | |
|---|---|---|---|
| **Área hidrográfica** | **Zóna hidrográfica** | **Código subzona hidrográfica** | **Subzona hidrográfica** |
| **Caribe** | **Caribe - litoral** | 1204 | Rio Canalete y otros arroyos directos al Caribe |
| | | 1205 | Directos Caribe golfo de Morrosquillo |
| | | 1206 | Arroyos directos al Caribe |
| | **Sinú** | 1302 | Medio Sinú |
| | | 1303 | Bajo Sinú |
| | **Caribe - Guajira** | 1505 | Río Camarones y otros directos Caribe |
| | | 1506 | Río Ranchería |
| | **Catatumbo** | 1601 | Río Pamplonita |
| | | 1605 | Río Algodonal (Alto Catatumbo) |
| **Magdalena - Cauca** | **Alto Magdalena** | 2102 | Río Timaná y otros directos al Magdalena |
| | | 2110 | Río Neiva |
| | | 2111 | Rio Fortalecillas y otros |
| | | 2112 | Río Baché |
| | | 2120 | Río Bogotá |
| | **Cauca** | 2608 | Rios Pescador - RUT - Chanco - Catarina y Cañaveral |
| | | 2609 | Ríos Amaime y Cerrito |
| | | 2610 | Ríos Tulua y Morales |
| | | 2617 | Río Cartama y otros directos al Cauca |
| | | 2636 | Río Paila |
| | | 2637 | Quebradas Las Cañas - Los Micos y Obando |
| | **Cesar** | 2802 | Medio Cesar |
| | | 2804 | Río Ariguaní |
| | **Bajo Magdalena** | 2901 | Directos al Bajo Magdalena entre El Plato y Calamar (MI) |
| | | 2902 | Directos al Bajo Magdalena entre El Plato y Calamar (MD) |
| | | 2903 | Canal del Dique margen derecho |
| | | 2904 | Directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura |
| | | 2908 | Ríos Chimicuica y Corozal |
| | | 2909 | Cienaga Mallorquín |
| **Orinoco** | **Meta** | 3516 | Lago de Tota |
| **Pacífico** | **Patía** | 5202 | Río San Jorge |
| | | 5203 | Río Mayo |
| | | 5204 | Río Juananbú |

Tabla 102. Subzonas hidrográficas en categoría *alta* en condiciones hidrológicas extremas de año seco.

| CATEGORÍA ALTA DEL ANÁLISIS INTEGRADO | | | |
|---|---|---|---|
| **Área hidrográfica** | **Zóna hidrográfica** | **Código subzona hidrográfica** | **Subzona hidrográfica** |
| **Caribe** | **Caribe - litoral** | 1201 | Río León |
| | | 1202 | Río Mulatos y otros directos al Caribe |
| | | 1203 | Río San Juan |
| | **Caribe - Guajira** | 1501 | Río Piedras - Río Manzanares |
| | | 1503 | Río Ancho y otros directos al Caribe |
| | | 1504 | Río Tapias |
| | | 1507 | Directos Caribe - Ay. Sharimahana Alta Guajira |
| | | 1508 | Río Carraipia - Paraguachon, directos al golfo Maracaibo |
| | | 1509 | Río Guachaca - Mendiguaca y Buritaca |
| | **Catatumbo** | 1602 | Río Zulia |
| | | 1603 | Río Nuevo Presidente - Tres Bocas (Sardinata, Tibú) |
| | | 1604 | Río Tarra |
| **Magdalena - Cauca** | **Alto Magdalena** | 2103 | Río Suaza |
| | | 2104 | Ríos directos al Magdalena (mi) |
| | | 2106 | Ríos directos al Magdalena (md) |
| | | 2108 | Río Yaguará y Río Iquira |
| | | 2109 | Juncal y otros ríos directos al Magdalena |
| | | 2113 | Río Aipe, Río Chenche y otros directos al Magdalena |
| | | 2115 | Directos Magdalena entre ríos Cabrera y Sumapaz |
| | | 2116 | Río Prado |
| | | 2119 | Río Sumapaz |
| | | 2121 | Río Coello |
| | | 2124 | Río Totare |
| | | 2125 | Río Lagunilla y otros directos al Magdalena |
| | **Saldaña** | 2203 | Medio Saldaña |
| | | 2207 | Río Cucuana |
| | | 2208 | Bajo Saldaña |
| | **Medio Magdalena** | 2303 | Directos al Magdalena entre ríos Seco y Negro (md) |
| | | 2304 | Directos Magdalena entre ríos Guarinó y La Miel |
| | | 2305 | Río La Miel (Samaná) |
| | | 2308 | Río Nare |
| | | 2311 | Directos al Magdalena Medio entre río Negro |

| CATEGORÍA ALTA DEL ANÁLISIS INTEGRADO | | | |
|---|---|---|---|
| Magdalena - Cauca | | 2319 | Río Lebrija y otros directos al Magdalena |
| | | 2321 | Quebrada El Carmen y otros directos al Magdalena |
| | Sogamoso | 2401 | Río Suárez |
| | | 2403 | Río Chicamocha |
| | | 2405 | Río Sogamoso |
| | Bajo Magdalena - Cauca - San Jorge | 2502 | Bajo San Jorge - La Mojana |
| | Cauca | 2601 | Alto Río Cauca |
| | | 2604 | Río Palo |
| | | 2607 | Río Guachal (Bolo - Fraile y Párraga) |
| | | 2611 | Río Frío |
| | | 2612 | Río La Vieja |
| | | 2613 | Río Otún y otros directos al Cauca |
| | | 2614 | Río Risaralda |
| | | 2615 | Río Chinchiná |
| | | 2622 | Río Desbaratado |
| | | 2627 | Río Piendamó |
| | | 2628 | Río Quinamayo y otros directos al Cauca |
| | | 2629 | Ríos Claro y Jamundí |
| | | 2630 | Ríos Lilí, Meléndez y Cañaveralejo |
| | | 2631 | Rios Arroyohondo - Yumbo - Mulalo - Vijes - Yotoco |
| | | 2632 | Ríos Guabas, Zabaletas y Sonso |
| | | 2633 | Ríos Guadalajara y San Pedro |
| | | 2634 | Río Cali |
| | | 2635 | Río Bugalagrande |
| | Nechí | 2701 | Río Porce |
| | Cesar | 2801 | Alto Cesar |
| | | 2805 | Bajo Cesar |
| | Bajo Magdalena | 2905 | Canal del Dique margen izquierda |
| | | 2906 | Cga. Grande de Santa Marta |
| | | 2907 | Directos Bajo Magdalena entre El Banco y El Plato |

| CATEGORÍA ALTA DEL ANÁLISIS INTEGRADO | | | |
|---|---|---|---|
| **Orinoco** | **Meta** | 3503 | Río Guatiquía |
| | | 3504 | Río Guacavía |
| | | 3507 | Río Garagoa |
| | | 3510 | Río Negro |
| | | 3518 | Río Túa y otros directos al Meta (mi) |
| | | 3521 | Río Cravo Sur |
| | **Arauca** | 3705 | Río Banadia y otros directos al río Arauca (md) |
| **Pacífico** | **Patía** | 5201 | Río Patía Alto |
| | | 5205 | Río Guáitara |

## Consideraciones finales sobre el análisis integrado del agua

El análisis integrado permite establecer relaciones entre los diferentes indicadores definidos en este estudio para evaluar el estado, la dinámica del agua, así como las presiones por uso y afectaciones. Este análisis puede ser insumo para definir acciones y estrategias a nivel de subzona hidrográfica en los instrumentos de planificación nacionales y regionales.

Por otro lado, permite identificar áreas temáticas de investigación y orientar en relación con la ampliación de cobertura de monitoreo hidrometeorológico, ambiental y sectorial a escalas nacional y regional.

Sigue siendo pertinente recalcar sobre la necesidad de estabilización, control de calidad, completitud y robustez de la información histórica y estadística para mejorar la precisión de los resultados, así como la resolución espacial y temporal requerida para la toma de decisiones de carácter nacional, regional y local.



**Foto por:**
Juan José Montoya Monsalve
Cuencias del río Patia.

CAPÍTULO 12

# CONSIDERACIONES FINALES DE LA EVALUACIÓN INTEGRADA DEL AGUA EN COLOMBIA

**Autores:**

**IDEAM:**
Martha García Herrán
Nelson Omar Vargas Martínez

**CTA/GSI/HH:**
Diego Arévalo Uribe

# 12. Consideraciones finales de la evaluación integrada del agua en Colombia

En este ítem final, se sintetizarán consideraciones temáticas vistas desde la integralidad del Estudio. Estas consideraciones deben entenderse como síntesis generales, oportunidades de mejora, alertas estratégicas para la gestión integrada del agua, y como referentes para la planificación y la toma de decisiones nacionales y regionales. A su vez, se constituyen en insumos para planes nacionales de desarrollo (PND) y para otros instrumentos de planificación, como el Plan Hídrico Nacional, el Programa Nacional de Monitoreo de Recurso Hídrico (PNMRH), el Programa Nacional de Aguas Subterráneas (PNSUB), los programas institucionales regionales de monitoreo del agua llamados Pirma (a cargo de las autoridades ambientales) y los planes sectoriales de relevancia y pertinencia para la gestión adecuada del recurso hídrico, en particular, y la sostenibilidad del patrimonio hídrico del país, a nivel general.

Adicionalmente, estas consideraciones resultan esenciales como insumo para diálogos sociales, acuerdos gremiales, estrategias territoriales y, definitivamente, son el pilar técnico científico para el «Ordenamiento Territorial alrededor del Agua», eje de transformación del actual PND.

## 1. Consideraciones sobre disponibilidad y variabilidad del agua superficial en Colombia

La evaluación del agua superficial se realiza a través del análisis de aridez y regulación hídrica; de la cuantificación y distribución de la oferta hídrica natural; de los eventos de sequía que han sucedido en el país y sus regiones; de la dinámica de las inundaciones, y de la evolución y dinámica de los glaciares y su relación con la alta montaña.

### Indicadores y oferta hídrica superficial

Los indicadores como el índice de aridez y el de regulación hídrica no presentan gran variación en las diferentes versiones del ENA ya que, a pesar de la actualización del periodo de referencia, los indicadores muestran las condiciones multianuales que sirven de referencia para cambios de largo plazo generados por la presión demográfica, los cambios de uso de suelo y el cambio climático.

Dado que el índice de aridez (IA) es una característica del clima, su actualización en las diversas versiones del ENA solo ha variado de acuerdo con las mejoras en calidad y resolución de los insumos meteorológicos, identificando de modo consistente las áreas propensas a la desertificación y a la degradación de los recursos de suelo y agua. Eso hace del IA una herramienta importante para resaltar estas áreas y priorizarlas para la elaboración de estrategias de conservación y desarrollo compatibles con los recursos disponibles.

El índice de regulación hídrica (IRH) está limitado a la cantidad de estaciones hidrológicas con un buen registro de caudales diarios; dado que la disponibilidad de estaciones hidrológicas no se ha aumentado, los resultados del IRH son semejantes a los presentados en la anterior versión del Estudio. Teniendo en cuenta los resultados del índice, la gestión adecuada de la tierra puede ser un enfoque eficaz para mejorar la regulación de la cantidad de agua, por lo cual el IRH es de gran utilidad para enfocar la priorización de estas acciones.

La medición de las variables hidroclimáticas involucradas en el ciclo hidrológico es una de las fuentes de información más relevante en el estudio del agua. Para esta versión del ENA, se resaltan las variables hidroclimáticas de la precipitación, la temperatura, el caudal y la evapotranspiración, actualizadas para el periodo 1981-2021, a partir de varias bases de datos analizadas durante los últimos cuatro años.

La respuesta hidrológica a la variabilidad climática natural se observa con más detalle en los mapas mensuales de *año seco.* Para tener en cuenta estos resultados en escenarios de planificación y gestión del recurso hídrico, se debe considerar el análisis por subzona hidrográfica, ya que, por ser una condición teórica, es improbable que estos efectos se presenten simultáneamente en todo el territorio nacional. Sin embargo, sí expresan la vulnerabilidad localizada

en condiciones secas que puede darse por fenómenos recurrentes de variabilidad natural o incluso ser más extremos a largo plazo.

En general, durante 2021, se presentaron valores de escorrentía cercanos y superiores al percentil 75 durante el primer semestre del año en las áreas Caribe, Magdalena-Cauca y Pacífico, es decir, valores en un rango por encima de lo normal, influenciados por la presencia del fenómeno de La Niña durante el año 2021 y de vientos alisios fortalecidos en la cuenca central del Pacífico durante este periodo.

Para los análisis de oferta hídrica superficial presentados, se espera continuar mejorando en el futuro los insumos meteorológicos e hidrológicos; así mismo aumentar la cobertura de la red de medición y explorar bases de datos construidas a partir de satélites o radares para la reducción de incertidumbre en regiones no instrumentadas.

## Eventos de sequía en Colombia

El uso de índices multivariados para los eventos de sequía permite evaluar su impacto en los diferentes componentes del ciclo hidrológico, incorporando un análisis de la propagación de los eventos en cada uno de ellos; así mismo, el uso de diferentes agregaciones temporales hace posible evidenciar la forma en que cada uno de los componentes mencionados se ve alterado como consecuencia del déficit de precipitación.

Los fenómenos de sequía afectan la oferta normal del recurso en el territorio; de tal forma, metodologías como la establecida en este estudio, que considera variables de precipitación, escorrentía y humedad del suelo, posibilita entender sus alcances en términos espaciales y comprender cómo, en cada una de las unidades de análisis, los eventos se desarrollan y se extienden; estas herramientas brindan a los tomadores de decisiones capacidades de enfoque en las áreas que puedan sufrir afectaciones importantes en el normal desarrollo de sus actividades ante la ocurrencia de un evento de similares características a los evidenciados con el análisis de las series históricas generadas.

Por su sencillez en el cálculo, esta metodología se puede incorporar en forma operativa en plataformas que permitan la visualización de los índices como apoyo en el seguimiento oportuno de estos eventos. Para ello, es importante establecer la operatividad de los insumos asociados con los cálculos, es decir, los parámetros de escorrentía y humedad del suelo, principalmente.

## Inundaciones y cuerpos de agua lénticos

Ante la magnitud y recurrencia de eventos extremos de origen hidrometeorológico en el territorio nacional, se requiere dar prioridad a la generación de conocimiento soportado en mediciones sistemáticas de las condiciones de flujo en los sistemas hidrológicos para fortalecer escenarios de amenaza de inundación. También es preciso consolidar insumos como los levantamientos topobatimétricos de alta resolución o las tecnologías de captura de datos Lidar aerotransportados o con drones para fortalecer el conjunto de datos necesarios para la aplicación continua de herramientas de modelación hidrológica e hidráulica en los tramos de río priorizados.

Otro aspecto importante corresponde al necesario fortalecimiento de personal técnico especializado que permita analizar, en forma oportuna, los datos recopilados y que garantice la generación continua de productos de modelación matemática de procesos hidrológicos, con énfasis en la caracterización de la amenaza de inundación, en la cual se incluyan escenarios probabilísticos de la ocurrencia de este tipo de procesos de inundación en el país.

Lo anterior concuerda con la necesaria articulación con la propuesta de realizar un ordenamiento del territorio alrededor del agua, con miras a la construcción de herramientas de planificación enmarcadas en el ciclo hidrológico que permitan a la sociedad establecer y diseñar medidas de adaptación, prevención o mitigación de los efectos adversos que puedan ser ocasionados como resultado de la indebida ocupación de áreas propensas a fenómenos de inundación.

En vista del continuo cambio de coberturas, presiones antrópicas, intervención de zonas de recarga, modificación de condiciones hidráulicas, entre otras acciones, se requiere propender por la implementación de instrumentos de seguimiento y ca-

racterización continua de los territorios vulnerables ante eventos de inundación, conocer sus eventuales impactos y gestionar el riesgo. Esto permitirá la definición de acciones oportunas de adaptación y estrategias de control, y la mitigación de los potenciales impactos ante eventos recurrentes, propios de la dinámica de los sistemas hídricos.

Establecer el estado del arte en el conocimiento de los servicios ecosistémicos brindados por los ecosistemas de ambientes acuáticos en Colombia (en especial, los asociados con los cuerpos de agua lénticos) se convierte en una imperiosa necesidad en un territorio con una alta vulnerabilidad ambiental y social, y que se encuentra en continuo desarrollo.

Para que se logre una mejor cuantificación del cambio real que han venido sufriendo las zonas potencialmente inundables a través del tiempo —ya sea de manera natural o debido a actividades antrópicas relacionadas con procesos graduales en el cambio del uso del suelo—, es necesario contar con los insumos actualizados para tal fin, como los mapas de *Ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia* y el de *Coberturas de la Tierra;* este último, a su vez, es insumo fundamental del mapa de *Ecosistemas,* ya que, como se mencionó en parágrafos anteriores en este estudio, se asumió que las ZPI no presentaron perturbaciones durante el paso del tiempo, lo cual claramente aumenta la incertidumbre y la especulación sobre las dinámicas en estas áreas.

### Evolución y dinámica de los glaciares y su relación con la alta montaña

En relación con el tema de glaciares, de persistir la actual tendencia de reducción del área glaciar colombiana es posible que, a finales del presente siglo, esté muy reducida esta cobertura en los glaciares más extensos y de mayor altitud, y extintos los más pequeños y de baja altitud. Esto dependerá tanto de la intensidad del clima global como de las condiciones regionales y locales, entre estas la altitud, la topografía, la exposición a la radiación solar, la actividad volcánica, el clima (precipitación y temperatura, principalmente) y la variabilidad climática (ENSO).

El balance de masa glaciar para los dos casos colombianos pone de manifiesto los condicionantes físicos locales en la evolución glaciar en Colombia. Por un lado, la Sierra Nevada El Cocuy o Güicán presenta estabilidad desde 2017, con ganancias de masa resultado de intensas precipitaciones de nieve con influencia de la cuenca del Orinoco. El segundo caso, el glaciar Santa Isabel, presenta un desequilibrio con el clima actual, y su extinción ocurriría durante los próximos 10 años.

En vista de la importancia del sistema glaciar colombiano como indicador de cambio climático en la zona ecuatorial, así como de la dinámica hídrica en la alta montaña colombiana que aporta gran parte del agua que demanda la población, es preciso mantener y expandir los sistemas y redes de monitoreo, dada la diversidad geográfica de la alta montaña, con el fin comprender las relaciones hídricas, más que todo entre el páramo y el bosque altoandino.

## 2. Consideraciones sobre el estado de conocimiento de las aguas subterráneas

Actualmente, Colombia no cuenta con información suficiente sobre el uso o la gestión de las aguas subterráneas de su territorio; lo que se traduce en que se desconocen aspectos fundamentales como la oferta y la demanda de aguas subterráneas. Esto hace que el estudio de las aguas subterráneas tenga muchas complejidades y que a nivel de país aún no se tenga claro lo que implican. Unas de esas complejidades es que las aguas subterráneas pueden ser recursos renovables o no renovables. Hay acuíferos o sectores del país en donde se extrae agua que no está conectada con el régimen de precipitación actual (acuíferos confinados); son zonas en donde se está haciendo una «minería del agua», porque cada $m^3$ que se explote o se consuma no se va a renovar por procesos naturales. Además, no existe información detallada que permita delimitar o identificar las zonas de recarga de los acuíferos. El número de autoridades ambientales que dieron respuesta a las solicitudes de información que se realizaron fue bajo (alrededor de un 55 %). Además, la información reportada sobre nuevos estudios hidrogeológicos adelantados en su jurisdicción es

escasa, lo que evidencia la falta de gestión en el tema de aguas subterráneas.

Basado en lo anterior, el país tiene la necesidad de acelerar las estrategias para mejorar la información sobre aguas subterráneas con la articulación de entidades; es necesario construir *modelos hidrogeológicos conceptuales* (MHC) de los sistemas acuíferos existentes. También es preciso contar con un monitoreo de aguas subterráneas (diseñar e implementar redes de monitoreo); este monitoreo debe enmarcarse en los programas institucionales regionales de monitoreo del agua (Pirma) a cargo de las autoridades ambientales, que son las responsables del monitoreo regional del agua y del recurso hídrico en las áreas de su jurisdicción.

Así mismo, es importante resaltar que el monitoreo del recurso hídrico subterráneo debe ser permanente, sistemático y riguroso (atender protocolos de muestreo y seguimiento) para los diferentes actores sociales, gremiales e institucionales.

Los MHC se deben trabajar en articulación con el SGC, como generador de la información del subsuelo en el país, y con el Ideam, como instituto generador de información sobre el monitoreo del recurso hídrico subterráneo. Además, se deben fortalecer los Pirma a cargo de las autoridades ambientales.

Por otra parte, hay limitaciones de consideración con la calidad de la información aportada a través de los inventarios de puntos de agua subterráneas, ya que no se conoce con claridad la cantidad real de puntos de captación, lo que dificulta la determinación de los usuarios y la demanda real del recurso hídrico subterráneo. Se debe mejorar la información aportada por estos inventarios, ya que la mayor parte de estos se limitan únicamente a realizar un conteo o a presentar la ubicación de los puntos de captación, y dejan de lado aspectos importantes como las unidades hidrogeológicas captadas, la profundidad, la condición o el uso de la captación, entre otros.

Estas consideraciones fueron tratadas para consolidar el Programa Nacional de Aguas Subterráneas (PNASUB), que forma parte de la Política Nacional para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (promulgada por el MADS en el 2010). Este programa fue construido con sectores gremiales, institucionales y académicos, y define acciones y estrategias para fortalecer la gestión de las aguas subterráneas en Colombia. Es pertinente destacar —y así se referencia en el documento de este programa— la necesidad de incorporar programas de formación permanente en hidrogeología a niveles técnico, profesional y de posgrado. Así mismo, es indispensable la articulación institucional del PNMRH, del Pirma y del PNASUB en el marco de las acciones y estrategias.

Finalmente, es necesario definir nuevas estrategias de aprovechamiento sostenible de sistemas acuíferos, priorizando la iniciativa de uso conjunto agua superficial-agua subterránea y de recarga artificial con base en el conocimiento a nivel de aprovechamiento de los sistemas acuíferos.

## 3. Consideraciones acerca de la dinámica de los sedimentos

La erosión hídrica potencial es severa, y muy severa ante todo en las subzonas localizadas en las vertientes de la Sierra Nevada de Santa Marta y en las vertientes de los ramales de la cordillera de los Andes. Esto se debe a las condiciones de alta pendiente y a una cobertura del suelo que, de forma predominante, tiene fines agrícolas.

El modelo de erosión hídrica potencial empleado no representa conceptualmente movimiento en masa; sin embargo, presenta resultados coherentes con la zonificación de amenazas por movimiento en masa y con el inventario de movimientos en masa.

Por otro lado, la relación de entrega en ladera es mayor en las subzonas localizadas en las vertientes de los ramales de la cordillera de los Andes y en la serranía de Perijá. Siendo así, el material erosionado en ellas tiene una alta probabilidad de transportarse al cauce o depósito más cercano, por lo que se afectarían las condiciones del recurso hídrico.

La información disponible con al menos un año completo es menor con respecto al ENA 2018, donde se revisó información de concentraciones para 64 estaciones, mientras que para 2022 solo

se cuenta con información en cinco estaciones. En el caso de transporte, en el ENA 2018 se analizaron 326 estaciones, mientras que para 2022 solo se cuenta con información completa para al menos un año adicional en 206 estaciones. Es importante continuar con un monitoreo constante para identificar cambios en el régimen de los sedimentos a nivel nacional.

Las zonas en las que se cuenta con valores mayores de erosión hídrica potencial, relación de entrega en ladera, y rendimiento de sedimentos estimado en estaciones y con balance de sedimentos corresponden a zonas donde se tienen valores altos de escorrentía, suelos con alta erodabilidad, altas pendientes y amplias áreas en coberturas de cultivos y pastos sin prácticas de conservación del suelo. Las zonas de depósito potencial se caracterizan por valores bajos de relación de entrega en ladera y rendimiento de sedimentos estimado en estaciones y con balance de sedimentos. La característica principal de estas zonas son las bajas pendientes.

Realizar cambios de cobertura e implementar prácticas de control y conservación de los suelos son medidas que pueden reducir, en cierto modo, la producción de sedimentos. Sin embargo, factores como la pendiente y la escorrentía son intrínsecas a las zonas, y si estas favorecen los procesos erosivos, estos seguirán ocurriendo.

Gracias a la resolución espacial y temporal de los análisis y a los productos presentados en este capítulo, es posible usarlos en escalas de mayor detalle y en estudios específicos de cuencas hidrográficas. De esta forma, pueden ser de utilidad en planes de ordenamiento territorial, en planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas, y en estudios de cuencas y microcuencas abastecedoras de acueductos, entre otros.

## 4. Consideraciones acerca de la aplicación de herramientas isotópicas en Colombia

Las herramientas isotópicas en Hidrología permiten validar otras técnicas hidrogeológicas, evaluar problemas asociados a la calidad del agua, reconocer interconexiones hidráulicas, y delimitar zonas de recarga y fuentes de contaminación. El primer paso para combatir los problemas de la calidad del agua es conocer el origen de los contaminantes. Los datos adquiridos por los especialistas en hidrología isotópica ayudan a los responsables de formular políticas en la planificación estratégica y la gestión de los recursos hídricos. Además, son útiles para determinar el origen y la edad del agua, y el flujo de las aguas subterráneas. Su uso se ha extendido a estudios de variabilidad y cambio climático. Se hace necesario difundir e ilustrar sobre el uso y las bondades de estas técnicas para estudiar y validar los flujos y procesos del ciclo del agua y, de manera particular, su importancia para abordar y validar estudios hidrogeológicos.

> El agua subterránea es el componente más desconocido del ciclo del agua. Los científicos emplean isótopos naturales como trazadores para averiguar si hay recarga del agua subterránea, de dónde procede, cómo se desplaza por debajo de la superficie terrestre, y si es vulnerable a la contaminación y a los cambios de las condiciones climáticas. (IAEA, 2019)

## 5. Consideraciones sobre usos del agua en Colombia

Persiste la necesidad de consolidar y unificar fuentes, y de mejorar la coherencia y estabilidad metodológica y conceptual en las fuentes de información oficial y disponible sobre los usos sectoriales del agua. El Estudio Nacional del Agua realiza un riguroso análisis de calidad de cada dato base asociado a la coherencia e indagación de origen metodológico y conceptual, que permite generar análisis y resultados con el menor nivel de incertidumbre posible. No obstante, existen sectores que cuentan con fuentes diversas y no coincidentes, en ocasiones por cambios relacionados con metodologías o conceptos; mejorar esta situación genera dos impactos positivos principales en futuros estudios: (1) menor desgaste en análisis de fuentes de información diversas buscando o concertando el dato con menor incertidumbre; y (2) mejor información y resultados sectoriales con bajo nivel de incertidumbre, trasladado a la posibilidad de toma de decisión en territorios con presencia sectorial.

La mejora continua de la información base en cantidad, calidad y cobertura abre una oportunidad asociada a la responsabilidad de los usuarios directos del agua y de los sectores de generar protocolos estables para la captura y el análisis de información sectorial; esta debe estar disponible para el correcto análisis territorial y posterior toma de decisiones orientadas a mejorar los indicadores de estado, presión y riesgo de los territorios. Aún son notorias las debilidades en la estabilidad de las metodologías, robustez de las estadísticas y subregistro en los reportes de uso del agua generados en instrumentos del SINA, como el SIRH y el RUA, y bases de datos de las tasas por uso del agua.

Los resultados sectoriales, territoriales y nacionales resultan coherentes al comportamiento histórico; resaltan algunos comportamientos tendenciales que hacen posible identificar cambios de comportamiento multianuales en la matriz general de uso del agua. Se identifica una reducción en el uso de agua azul del sector agrícola (demanda hídrica y huella hídrica azul), lo cual se explica por los siguientes factores: (a) cambios metodológicos en la estadística agrícola, con alto impacto en el análisis de áreas de pastos a escala nacional; (b) alta dependencia del análisis y resultados asociados al comportamiento del clima, lo que implica que el uso de agua azul del sector agrícola (demanda hídrica y huella hídrica azul) podría bajar aunque las áreas de cultivo aumenten, si se analiza un año muy lluvioso; (c) se dispone de nueva información relacionada con riego a escala nacional, lo que implica que se tiene un cálculo más ajustado a la realidad del uso del agua agrícola.

Se resalta el trabajo articulado que se ha desarrollado con la UPRA para el análisis del uso de agua agrícola, lo cual ha permitido continuar con el proceso de mejoramiento continuo de cifras de áreas sembradas que son la base para el cálculo de requerimiento hídrico de cultivos.

Continúa existiendo un campo de trabajo amplio con oportunidades de mejora que se centra en el uso de agua real de los sistemas de riego en el país, lo cual permitirá en el futuro reducir el nivel de incertidumbre de los resultados de uso de agua agrícola, pasando de demanda requerida a demanda real.

Los usos de agua no agrícolas calculados para 2020 en algunos sectores presentan cambios significativos en relación con el año 2016, que se relacionan con los siguientes factores principales: (1) mejoramiento en la eficiencia en el uso de agua; (2) efectos de la pandemia en el año analizado; (3) cambios y complementos en la fuente de datos con más y mejor información para algunos sectores, por ejemplo, industria, doméstico e hidrocarburos.

Existen sectores que todavía presentan importantes limitaciones en la generación y disponibilidad de información; se resalta el caso del sector construcción, que tiene una gran oportunidad de mejora en la generación y el análisis de sus usos de agua.

Las proyecciones de uso del agua se presentan segmentadas por la baja calidad de información de algunos sectores, lo que impide generar un valor consolidado nacional, y deja abierta la posibilidad de profundizar y precisar el resultado de las proyecciones. La coincidencia de año horizonte entre los resultados de proyecciones y los resultados disponibles de cambio climático ha permitido ajustar el modelo de cálculo con un nuevo argumento de alta incidencia técnica.

Se identifican además *oportunidades de corto plazo* para fortalecer el tema usos del agua:

- Con el análisis de evolución del concepto de demanda y conceptos derivados, se evidencia la importancia de actualización coordinada del marco normativo que utiliza estos conceptos. La falta de coherencia entre los decretos que determinan la metodología de TUA —que no se han actualizado en temas como la demanda e índice de escasez desde 2004, y la evolución nominal, conceptual y metodológica de los usos del agua e indicadores en los sucesivos estudios nacionales del agua— ha generado una brecha técnica entre la evaluación del estado del recurso hídrico y la aplicación regional de los instrumentos económicos que tienen como propósito regular los usos.

- Sigue identificándose la oportunidad de mantener revisión y análisis continuos de la metodología de estimación sectorial de usos del agua; en

particular, se hace énfasis en el trabajo de actualización y mejoramiento continuo que debe mantenerse con los principales sectores usuarios del agua, sector agropecuario y sector de generación de energía.

- A partir de los resultados en los niveles nacional y regional, por departamento y subzona hidrográfica, se hace evidente la necesidad de fortalecer y consolidar los instrumentos regionales que permitan bajar la escala de los resultados del Estudio Nacional del Agua. En particular, se menciona la Evaluación Regional del Agua (ERA), que es la herramienta idónea para dar continuidad regional y mayor nivel de detalle a los resultados del ENA.

- A partir de los resultados sectoriales, se identifica la oportunidad de generar análisis detallados subsectoriales que permitan obtener elementos que quedan ocultos en el resultado consolidado. Se identifica, en particular, la oportunidad de generar espacios de trabajo individuales con los principales gremios agrícolas, de forma que se pueda analizar el uso específico del agua para las actividades productivas de los principales productos y procesos, agrícola y poscosecha, con sus singularidades y diferencias regionales.

- Se identifica el reúso del agua como una potencial actividad que podría generar alto impacto en la condición de presión por uso de agua de un territorio. No obstante, aún no existe información consolidada respecto al nivel de implementación de procesos de circularidad en uso de agua. Esta información será de alta relevancia para futuros estudios nacionales del agua y análisis a escala regional.

- El uso conjunto de agua superficial y agua subterránea debe considerarse para reducir los consumos de agua superficial en áreas de alta criticidad debida a presiones por uso y contaminación. En este sentido, se debe mejorar el conocimiento de los sistemas acuíferos para determinar oportunidades de aprovechamiento de extracción por pozos profundos y de recarga artificial.

- Así mismo, se deben consolidar estadísticas de importaciones de agua y de uso de las aguas subterráneas.

## 6. Consideraciones sobre calidad del agua y uso de plaguicidas

El monitoreo de referencia de calidad del agua a escalas nacional y regional requiere completitud de datos y variables, control de calidad de datos, fortalecimiento del monitoreo hidrobiológico, mejoramiento de la cobertura geográfica y oportunidad de la información para llegar a escenarios de alerta temprana por calidad del agua. En este apartado se muestran las consideraciones derivadas de los avances realizados con la información disponible.

### Calidad del agua

La unión de esfuerzos para el diseño y la construcción de los programas de monitoreo del agua y el fortalecimiento de capacidades, y para el monitoreo nacional, regional y local son necesarios para el mejoramiento de la evaluación de las condiciones de la calidad del agua, lo cual permite dar el soporte científico a la generación de conocimiento y a la toma de decisiones. Por tanto, es necesario continuar con la formulación e implementación de programas institucionales regionales de monitoreo integral del agua (Pirma) que aporten a la evaluación regional y nacional del agua.

Los resultados de las cargas generadas para población, sacrificio y beneficio de café indican una predominancia del parámetro DQO (demanda química de oxígeno) y, en segundo lugar, de los SST (sólidos suspendidos totales). Estos resultados muestran la necesidad de enfatizar en que los sistemas de tratamiento de aguas residuales se enfoquen en mejorar sus procesos para la reducción de carga para dichos parámetros. En el caso de la DBO (demanda bioquímica de oxígeno), aunque no es el más representativo de los resultados obtenidos, en la medida en que se mejoren los procesos para aumentar la remoción de DQO, directamente se aumenta la remoción de la DBO.

En términos de información, es importante disponer de inventarios actualizados y verificados de los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas urbanas y rurales, y de las plantas de beneficio animal, coberturas o caudales de aguas residuales tratadas y sus respectivos porcentajes de remoción de carga; esto para que la estimación de las cargas contaminantes vertidas esté lo más cercano posible a la realidad del territorio.

En futuros estudios nacionales del agua, es importante continuar el trabajo articulado con entidades como la Federación Nacional de Cafeteros para determinar con mayor precisión el volumen de vertimientos que previamente son tratados mediante algún sistema y, de esta manera, cuantificar la carga removida antes de ser vertida en las fuentes hídricas. Otro aspecto para considerar es determinar el potencial impacto que las aguas residuales vertidas en suelo pueden tener sobre las fuentes hídricas.

En cuanto a la información del uso de agroquímicos, es fundamental generar estadísticas a nivel municipal; de esta manera se puede analizar la incidencia del uso de estas sustancias en la calidad de las fuentes hídricas. De igual modo, se deben fomentar investigaciones que determinen el porcentaje de agroquímicos que por escorrentía superficial directa pueden llegar a una fuente hídrica (contaminación difusa) y cómo determinadas variables (por ejemplo, la precipitación) pueden aumentar dichos aportes.

## Uso de mercurio

A partir de las consultas con expertos que administran las plataformas y los sistemas de información de uso de mercurio en el país, se identificaron varios aspectos que se deben considerar en un futuro para generar un análisis integral del uso de mercurio en la actividad minera (incluida la minería ilegal) y su incidencia en la calidad del recurso hídrico; estas se enuncian a continuación:

- Los sistemas de información actuales no garantizan un monitoreo continuo temporal y espacial; por lo tanto, no se podrían generar análisis comparativos en diferentes periodos de tiempo y zonas que permitan evidenciar cambios asociados al uso de esta sustancia.

- Parte de las mediciones de mercurio se realizan directamente sobre las fuentes hídricas; en estos casos, los resultados están por debajo del límite de detección, ya que el mercurio sedimenta y no es detectado en las muestras de agua.

- Se presenta una distribución de mediciones más que todo en la zona Andina y en parte del Pacífico; sin embargo, en otras zonas donde hay presencia minera y uso de mercurio no se tienen mediciones por dificultades de acceso a dichas áreas, lo que no permite generar un diagnóstico completo en todo el país, aspecto que resulta crucial para el Estudio Nacional del Agua.

- Desde el ámbito nacional, se debe diseñar una plataforma para el reporte y la centralización de la información bajo unos criterios técnicos que permitan generar consolidados a nivel del país. Para esto se requiere elaborar un protocolo para la toma de muestras de mercurio en los diferentes medios que garanticen la relación entre el mercurio detectado y la actividad minera.

- La falta de normatividad en Colombia no permite establecer si las concentraciones de mercurio detectadas en las muestras sobrepasan un determinado límite que genere afectaciones en los ecosistemas. En las condiciones actuales, las mediciones facilitan reportar el uso de esta sustancia que está prohibida, pero no logran determinar su impacto en el recurso hídrico.

Sobre estos y otros aspectos se debe diseñar e implementar una agenda de trabajo institucional que, con vistas al futuro, permita generar información técnica y de alta confiabilidad, con el fin de hacer análisis sobre el uso de mercurio en la actividad minera y determinar el impacto que tiene, ante todo, sobre las fuentes hídricas; esto, no solo para dar cumplimiento al Convenio de Minamata, sino para promover todo el accionar institucional del país en materia ambiental, incluido el Estudio Nacional del Agua.

## Uso de plaguicidas

A través de diversos análisis se ha venido mostrando, de forma general, la frecuencia del uso de plaguicidas por departamento, información de gran importancia en salud pública. Es relevante destacar que se siguen usando plaguicidas de categoría toxicológica considerable, entre estos los de categoría muy peligrosa, con representantes como los organofosforados, los cuales siguen siendo los compuestos químicos más usados a nivel nacional en actividades agrícolas, pecuarias y sanitarias de acuerdo con lo reportado en la literatura.

Se registra que el mayor reporte de uso de plaguicidas lo hacen departamentos que informan su uso tanto para el control de vectores en salud pública como en el sector agrícola de sus municipios; sin embargo, esto no quiere decir, necesariamente, que tienen más uso de estos compuestos tóxicos, sino que tienen mayor cobertura y reporte.

En cuanto a la toxicidad, el mayor uso correspondió a la categoría de moderadamente peligrosa (II) con el 57,1 %, seguido por la de ligeramente peligrosa (III) con 23,5 %; según la clasificación toxicológica establecida por la Organización Mundial de la Salud (OMS), es importante notar que hubo una notable disminución en el uso de plaguicidas de la categoría sumamente peligrosa (Ia) con el 0,3% y muy peligrosa (Ib) con el 5,6% con relación a años anteriores (1,1 % y 21,0 %, respectivamente).

Los plaguicidas para la salud pública no están cubiertos por la legislación sobre plaguicidas en el 40,0 % de los países, lo que indica que la reglamentación en muchos es claramente inadecuada. De acuerdo con el Código de Conducta, la reglamentación sobre plaguicidas debe abarcar todos los tipos de estos compuestos químicos para todos los sectores en los que se vayan a emplear.

En 2018, en la encuesta mundial sobre la situación actual de manejo de plagas en la agricultura y salud pública, la OMS y la FAO recomendaron a 194 países en vía de desarrollo, incluida Colombia, revisar su marco jurídico para la gestión de plaguicidas, establecer colaboración (sub)regional, proteger y vigilar la salud de los aplicadores de plaguicidas, y proporcionar capacitación a los agricultores sobre la aplicación de la gestión integrada de plagas y el uso del equipo de protección personal.

El uso de plaguicidas afecta a los individuos de la comunidad que habitan o laboran en el área de influencia de estos tóxicos y se convierte en un problema de salud pública creciente que tiene alto costo social, económico y ambiental; por tanto, exige una vigilancia intersectorial articulada y oportuna, en particular en los países en desarrollo, donde el trabajo agrícola es una de las labores predominantes; un modelo de desarrollo sostenible requiere más atención a los riesgos laborales en la agricultura.

La información aporta datos importantes sobre las características y condiciones de la población con riesgo de exposición a plaguicidas en las diferentes actividades agrícolas relacionadas con cultivos asociados y transitorios en diferentes zonas del país; también contribuye al desarrollo de actividades en el cambio de conductas respecto al manejo responsable de plaguicidas para minimizar los posibles casos de intoxicación y contaminación en cada uno de los municipios y departamentos.

Es fundamental el apoyo de las entidades territoriales de salud, con el fin de contar con información permanente que contribuya a la formulación de políticas y acciones de inspección, vigilancia y control. Es importante que en las estrategias nacionales se involucre el trabajo participativo de las comunidades y líderes comunitarios para realizar el control de riesgos con enfoques actualizados en salud ambiental, con acciones de promoción y prevención, y para implementar capacitaciones y campañas educativas en la población en riesgo en cada entidad territorial.

Una de las principales limitaciones del Estudio involucra el sesgo de memoria por la forma de recolección de la información basada en el autorreporte de los participantes por medio de un formulario de encuesta aplicado a través de una entrevista. Durante la pandemia de la COVID-19, se presentó una disminución en la continuidad y oportunidad en el reporte de la información por parte de las entidades territoriales de salud; de igual manera, los datos de algunas entidades fueron bajos debido a que solo realizan la vigilancia por laboratorio a los aplicado-

res de plaguicidas, y en salud pública para el control de vectores durante brotes o porque se presentó un brote de intoxicación. Estas limitantes pueden influir en la consolidación de la información, ya que al no tener un reporte de información de manera continua, no es posible contar con el panorama nacional del uso de plaguicidas; por ello, los resultados obtenidos solo permitieron reunir información general sobre los tipos de plaguicidas empleados en doce departamentos del país.

## 7. Consideraciones sobre desabastecimiento hídrico municipal por eventos climáticos extremos

Se resalta la importancia de contar, a nivel nacional, con una base de datos interinstitucional detallada, estructurada y estandarizada que permita robustecer los análisis que se realizan en torno a las afectaciones presentadas a escala municipal por la ocurrencia de eventos hidroclimatológicos y, en particular, sobre la prestación del servicio de acueducto.

Es importante avanzar en la georreferenciación de las captaciones de los acueductos municipales de Colombia, de forma que se puedan fortalecer los análisis y se tengan conclusiones mucho más precisas en torno a la susceptibilidad al desabastecimiento hídrico de las poblaciones. Así mismo, es necesario avanzar con la información sectorial y de características de cuencas abastecedoras de acueductos y en la caracterización de sistemas acuíferos que abastecen los acueductos.

Dado que la información es insuficiente para cubrir en su totalidad los aspectos que se requieren en el análisis del componente de desabastecimiento hídrico, es importante fortalecer la información relacionada con la caracterización de fuentes hídricas de abastecimiento e incentivar el monitoreo de cantidad y calidad del agua en estas, con el objetivo de tener mejor resolución que soporte la toma de decisiones enmarcadas en la gestión integrada del agua.

La implementación de estrategias de abastecimiento, como los acueductos regionales, en zonas del país con problemáticas asociadas con el uso del recurso hídrico y aumento considerable de su población han ayudado a solventar las dificultades presentadas en torno al manejo de la demanda hídrica para consumo humano. De este modo, se garantiza la ampliación de la cobertura, la sostenibilidad de las empresas de servicios públicos, y se mejora la calidad y continuidad de la prestación del servicio de acueducto en el territorio nacional. Se destaca —por ejemplo, en departamentos como Antioquia, en particular en el área metropolitana y Rionegro, y en Bogotá D. C.— que es bajo el nivel de afectación por situaciones de desabastecimiento asociadas tanto con temporadas secas como de lluvia. Así mismo, se resalta la disminución de la problemática en el departamento de Santander, asociada más que todo a la implementación de estrategias y soluciones a nivel operativo para hacer frente a la afectación por desabastecimiento.

## 8. Aportes del Ideam al reporte de indicadores ODS 6

Con el propósito de fortalecer el proceso de recopilación de insumos para los indicadores ODS 6 por parte de Colombia, es importante tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- La articulación interinstitucional es clave para facilitar el flujo de la información en el reporte de insumos para la iniciativa ODS. Si bien el Ideam ha participado de manera oportuna en el reporte de los indicadores y cuenta con información en la escala nacional que es útil para diferentes metas, es necesario continuar con el fortalecimiento interinstitucional que permita avanzar en los análisis nacionales e involucre los resultados regionales e incluso sectoriales, con el fin de tener resultados con mayor resolución. En este sentido, es importante resaltar el fortalecimiento del Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH) con información generada por las autoridades ambientales regionales.

- Es importante avanzar en la automatización y sistematización de los procesos del ENA en las diferentes temáticas. Esto permitirá aumentar la frecuencia de reporte de los indicadores que hacen parte no solo de iniciativas como los ODS, sino de otras que se adelantan en el orden nacional.

- El fortalecimiento de las capacidades técnicas, tecnológicas y presupuestales permite que haya una mejor generación de datos e información que logre la comparabilidad a nivel internacional de manera estandarizada, que refleje las condiciones del recurso hídrico y que muestre el avance de los países en la implementación de los ODS. En este sentido, es necesario fortalecer el monitoreo del recurso hídrico a escalas nacional y regional, en términos de cantidad y calidad del agua, tanto para aguas superficiales como para las subterráneas, de forma que se amplíe la cobertura en el país y se tenga mayor y mejor información que soporte el conocimiento de la dinámica del agua en Colombia y su comparabilidad con otros países.

## 9. Hacia un indicador de seguridad hídrica

En el marco de ENA 2022, se realizó una primera aproximación nacional al *índice de seguridad ídrica,* tomando como base la metodología aplicada por RAP-E en el Plan de Seguridad Hídrica (RAP-E, PNUD, 2021), el cual se basa en el concepto de seguridad hídrica entendido como:

> La capacidad de una población de resguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para mantener los medios de subsistencia, el bienestar humano y el desarrollo socioeconómico; para garantizar la protección contra la contaminación del agua y los desastres asociados al agua; y para preservar los ecosistemas en un clima de paz y estabilidad política. (UN-WATER, 2013)

Para el desarrollo de esta metodología se consideran cinco dimensiones: gobernanza, estado del recurso hídrico, riesgo climático, estado de conservación de servicios ecosistémicos y estado de condiciones socioeconómicas para la seguridad hídrica.

Con base en un análisis detallado de la metodología propuesta por la RAP-E y PNUD, se identificaron limitaciones para la extrapolación geográfica de los indicadores y su análisis, partiendo de las 78 SZH analizadas en el Plan de Seguridad Hídrica de la RAP-E y PNUD, y buscando pasar a un análisis nacional que incluya la totalidad de SZH del país. Se avanzó en una modificación metodológica de la aplicación del concepto en el nivel nacional, manteniendo las mismas cinco dimensiones; pero hay una variación de los indicadores estimados, en total veintiún indicadores, de los cuales diez se extraen directamente del ENA y otros seis son producto de información generada por el Ideam.

Las principales conclusiones del ejercicio fueron:

- Los resultados de la primera aproximación presentan coincidencias generales con los resultados de los diferentes análisis generados por ENA 2022. No obstante, debe existir un proceso de discusión técnica detallado de las fuentes de información, conceptos asociados y análisis de los resultados por cada una de las dimensiones, ya que las dimensiones segmentadas pueden ofrecer información que aporte un valor añadido.

- Se considera que la aplicación dimensional y ponderada multidimensional debe implicar un proceso de homogenización de las fuentes de información, con el propósito de estandarizar la calidad de los datos de entrada y, por tanto, la incertidumbre asociada al análisis y a la interpretación de los resultados.

- Por las limitaciones que presentan los resultados frente a los análisis de indicadores del ENA, no se incluyeron los resultados del primer ejercicio en la publicación; no obstante, hay un camino de trabajo por desarrollar en la aplicación de este indicador en el país por SZH y a niveles geográficos de escala de detalle.

## 10. Consideraciones finales sobre el análisis integrado del agua y la necesidad de fortalecer capacidades regionales para el monitoreo y la evaluación integrada del agua

El análisis integrado permite establecer relaciones entre los diferentes indicadores definidos en este

estudio para evaluar el estado, la dinámica del agua, así como las presiones por uso y afectaciones. Este análisis puede ser insumo para definir acciones y estrategias a nivel de subzona hidrográfica en los instrumentos de planificación tanto nacionales como regionales.

Por otro lado, permite identificar áreas temáticas de investigación, y orientar en relación con la ampliación de cobertura de monitoreo hidrometeorológico, ambiental y sectorial, también a niveles nacional y regional.

Sigue siendo pertinente recalcar sobre la necesidad de estabilización, control de calidad, completitud y robustez de la información histórica y estadística para mejorar la precisión de los resultados, así como la resolución espacial y temporal requerida para la toma de decisiones nacionales, regionales y locales.

Finalmente, es perentorio fortalecer las capacidades regionales para el monitoreo y la evaluación integrada del agua, lo cual es viable con el avance de las evaluaciones regionales del agua (ERA), que deben aplicar de manera permanente las autoridades ambientales en todos los componentes del ciclo hidrológico; de esta forma, se podrá contar con información suficiente, oportuna y confiable para la planificación y toma de decisiones sobre gestión integral del agua en los sistemas hídricos superficiales y subterráneos de sus áreas de jurisdicción. Por supuesto que estas evaluaciones deben soportarse en un monitoreo sistemático y permanente de las variables del ciclo hidrológico que deben ser definidas en los componentes estratégicos, programáticos y tecnológicos de sus programas institucionales regionales de monitoreo (Pirma), que deben atender tanto los lineamientos del Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico (PNMRH) como las directrices del Programa Nacional de Aguas Subterráneas (PNASUB) liderados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS).

# REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADR. (2007). ***Distritos de riego.*** Reporte, Base de datos, Instituto Colombiano para el Desarrollo Rural (Incoder). Bogotá, Agencia de Desarrollo Rural.

Agencia Nacional de Hidrocarburos. (13 de 09 de 2022). ***Producción fiscalizada de hidrocarburos.*** Obtenido de la página web de la ANH, https://www.anh.gov.co

Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (2000). ***Reseña toxicológica del cromo.*** Atlanta, GA: ATSDR y Departamento de Salud y Servicios Humanos de EUA.

Aggarwal, P. K., Froehlich, K., Gonfiantini, R., y Gat, J. R. (2005). ***Isotope Hydrology: A Historical Perspective from the IAEA. Isotopes in the Water Cycle***, 3–8. doi:10.1007/1-4020-3023-1_1

Aggarwal, P., Romatschke, U., Araguas-Araguas, L. et al. (2016). Proportions of convective and stratiform precipitation revealed in water isotope ratios. ***Nature Geosci 9***, 624–629. https://doi.org/10.1038/ngeo2739

Ako, A.A., Eyong, G.E.T., Shimada, J., Koike, K., Hosono, T., Ichiyanagi, K. et al. (2014). Nitrate contamination of groundwater in two areas of the Cameroon Volcanic Line (Banana Plain and Mount Cameroon area). ***Appl. Water Sci. 4***, 99–113

Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2019). ***Guía para el seguimiento y evaluación de políticas públicas.*** Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.

Alexandrino DAM., A. M. (2022). Revisiting pesticide pollution: The case of fluorinated pesticides. ***Environmenl Pollution*** 292, 1-10.

Alonso Ramos, E. (2021). ***Guía metodológica para la implementación de soluciones individuales de saneamiento en zonas rurales.*** Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Disponible en https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/27749

Álvarez, A. J. (1983). ***Geología de la cordillera Central y el occidente colombiano y petroquímica de los intrusivos granitoides mesocenozoicos.*** doi:https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol26.2.1983.53

Amrose, S., Cherukumilli, K., y Wright, N. (2020). Chemical Contamination of Drinking Water in Resource-Constrained Settings: Global Prevalence and Piloted Mitigation Strategies. ***Annu. Rev. Environ.*** Resour, 45:195-226.

ANA. (2019). ***ODS 6 en Brasil. Visión de ANA sobre los indicadores.*** Brasilia: Agencia Nacional de Aguas.

Andeg. (11 de marzo, 2020). ***Andeg espera que en 2020 generación térmica este por el orden de un 25%.*** Asociación Nacional de Empresas Generadoras Obtenido de https://www.andeg.org/2020/03/11/andeg-espera-que-en-2020-generacion-termica-este-por-el-orden-de-un-25/

Appelo, C.A.J. y Postma, D. (2010). ***Geochemistry, groundwater and pollution.*** 2.ª ed. CRC Press.

Argiriou A., Lykoudis S. (2006). Isotopic composition of precipitation in Greece. ***Journal of Hydrology,*** 327, 3-4, 486-495.

Banco Mundial. (15 de diciembre, 2022). ***El Banco Mundial en Colombia.*** (B. Mundial, Ed.) Recuperado de https://www.bancomundial.org/es/country/colombia/overview#:~:text=La%20econom%C3%ADa%20colombiana%20se%20ha,7%2C1%25%20en%202022.

Barrero Z., J. (2017). ***Geografía física de Colombia.*** Bogotá, Colombia: Fundación Universitaria del Área Andina.

Benetti, M.; Reverdin, G.; Pierre, C.; Merlivat, L.; Risi, C.; Steen-Larsen, H. C. y Vimeux, F. (2014). Deuterium excess in marine water vapor: Dependency on relative humidity and surface wind speed during evaporation. ***Journal of Geophysical Research: Atmospheres***, 119(2), 584–593. doi:10.1002/2013jd020535.

Bertrand, G., Siergieiev, D., Ala-Aho, P. y Rossi, P. M. (2013). Environmental tracers and indicators bringing together groundwater, surface water and groundwater-dependent ecosystems: importance of scale in choosing relevant tools. ***Environmental Earth Sciences, 72(3)***, 813–827. doi:10.1007/s12665-013-3005-8.

Bethke, C. M. y Johnson, T. M. (2008). Groundwater Age and Groundwater Age Dating. ***Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 36(1)***, 121–152. doi:10.1146/annurev.earth.36.031207.124210

Borselli, L., Cassi, P. y Torri, D. (2008). Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. ***Catena, 75(3)***, 268–277. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.006

Budyko, M. y Zubenok, L. (1974). ***Methods of determining evaporation from the land surface.*** En O. M. Mundial (Ed.), Workshop of the water balance of Europe. Bulgaria. Obtenido de https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000020552

Burke, R., Todd, S., Lumsden, E., Mullins, R., Mamczarz, J., Fawcett, W. et al. (2017). Developmental neurotoxicity of the organophosphorus insecticide chlorpyrifos: from clinical findings to preclinical models and potential mechanisms. ***Journal Neurochem, 142;Suppl 2***: 162-177.

Buttle, J. M. (1994). Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre-event water from drainage basins. ***Progress in Physical Geography, 18(1)***, 16–41. doi:10.1177/030913339401800102

Cabezas D., Carrasco F. y Mafla E. (2002). ***El riego, la producción y el mercado. Programa de capacitación a promotoras y promotores campesinos.*** Coordinación CESA. Consorcio CAMAREN.

Camargo, Y., Tovar, F. y Alvarez, E. (2021). Residuos de plaguicidas en cultivos del municipio Zona Bananera, departamento del Magdalena, Colombia. ***Revista Internacional de Contaminación Ambiental , 37:*** 145-153.

Camargos, C., Julich, S., Houska, T., Bach, M. y Breuer, L. (2018). Effects of input data content on the uncertainty of simulatingwater resources. ***Water (Suiza), 10(5),*** 1–18. https://doi.org/10.3390/w10050621

Canter, L.W. (1997). ***Nitrates in groundwater.*** Taylor y Francis.

Cañas, H., Pérez, O., Ruíz, D., Herrera, W., Watson, A. et al. (2019). ***Modelo Hidrogeológico Conceptual Valle Medio del Magdalena Planchas 108 y 119 Puerto Wilches, Barrancabermeja, Sabana de Torres y San Vicente de Chucurí.*** Bogotá D.C.: SGC.

Cárdenas O, S. E. (2005). Estudio epidemiológico de exposición a plaguicidas organofosforados y carbamatos en siete departamentos colombianos, 1998-2001. ***Biomédica, 25:***170-80.

Cárdenas, O. S. (2010). Uso de plaguicidas inhibidores de acetilcolinesterasa en once entidades territoriales de salud en Colombia, 2002-2005. ***Biomédica, 30***:95-106.

Cárdenas, O. S. (2012). Actividad de la acetilcolinesterasa en trabajadores e individuos con riesgo de exposición a plaguicidas organofosforados y carbamatos en 15 departamentos de Colombia, 2006-2009. ***Ciencia & Trabajo,*** 43:120-128.

Cárdenas, O., Díaz, D. y Castañeda, C. (2019). Uso de plaguicidas en Colombia (2013-2016). Capítulo 7, Agua, salud y medio ambiente. ***Estudio Nacional del Agua 2018.*** Bogotá, D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Minambiente.

Cárdenas, O., Díaz, D., Castañeda, C. y Beltrán, M. (2015). Uso de plaguicidas en 20 departamentos de Colombia, 2012. Capítulo 6. Calidad de Agua. E***studio Nacional del Agua 2014.*** Bogotá, D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Minambiente.

Cárdenas, O., Silva, E. y Nava, G. (2012). Actividad de la acetilcolinesterasa en trabajadores e individuos con riesgo de exposición a plaguicidas organofosforados y carbamatos en 15 departamentos de Colombia, 2006-2009. ***Ciencia & Trabajo, 43:***120-128.

Carroll R.J. y Ruppert D. (1996). The Use and Misuse of Orthogonal Regression in Linear Errors in-Variables Models. ***American Statistical Association, 50(1).***

Carvalho, F. (2017). ***Pesticides, environment, and food safety. Food and Energy Security.*** FoWiley-Blackwell Publishing Ltd. https://doi.org/10.1002/fes3.108.

Chicangana, G. y Kammer, A. (2013). Evolución tectónica de la cordillera Oriental de Colombia. Desde la apertura del océano Iapeto hasta la conformación de la Pangea: una visión preliminar. Primera Parte: aspectos geológicos. ***Geología Colombiana, 38***, 65–74. Recuperado a partir de https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/61349

Clark, I. y Fritz, P. (1997). ***Environmental isotopes in hydrogeology***. CRC Press.

Clark, I. (2015). Groundwater Geochemistry and Isotopes. CRC Press.

Conant, B., Robinson, C. E., Hinton, M. J. y Russell, H. A. J. (2019). A framework for conceptualizing groundwater-surface water interactions and identifying potential impacts on water quality, water quantity, and ecosystems. ***Journal of Hydrology. doi:10.1016***/j.jhydrol.2019.04.050

Condesan e Ideam. (2020). ***Informe levantamiento topográfico y de batimetría del lago de Tota. Proyecto Regional "Adaptación a los Impactos del Cambio Climático en Recursos Hídricos en los Andes"*** (AICCA).

Consejo de Estado. (2001). ***Endosulfán sí es peligroso y está prohibido en Colombia.*** Comunicado para publicación abril 2 de 2001 [en línea]. Bogotá, D.C.

Cook, P. y Herczeg, A. L. (1999). ***Environmental tracers in subsurface hydrology.*** Kluwer Academic Publishers.

Corpocaldas, UTP y GIAS. (2015). ***Plan de Manejo Ambiental del Acuífero del río Risaralda.*** Manizales: Corpocaldas.

Corpochivor. (2018). ***Plan de Manejo Ambiental del Acuífero Sunuba.*** Garagoa: Corpochivor.

Craig, H. (1961) Isotopic Variations in Meteoric Waters. ***Science, 133***, 1702-1703. http://dx.doi.org/10.1126/science.133.3465.1702

Crawford, J., Hughes, C. E. y Lykoudis, S. (2014). Alternative least squares methods for determining the meteoric water line, demonstrated using GNIP data. ***Journal of Hydrology, 519***, 2331–2340. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.10.033

DANE. (2020). Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA). ***Boletín técnico.*** Bogotá D.C.: (Departamento Nacional de Estadísticas)

DANE. (2 de agosto, 2018). ***Censo Nacional de Población y Vivienda 2018.*** Recuperado de https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivienda-2018/donde-estamos

DANE. (17 de mayo, 2018). ***Encuesta Anual Manufacturera 2017.*** Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Recuperado de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/eam/boletin_eam_2017.pdf

DANE. (2014). ***Censo Agropecuario.*** Recuperado el 27 de febrero, 2023 de https://www.dane.gov.co/files/CensoAgropecuario/entrega-definitiva/Boletin-5-Etnicos/5-Boletin.pdf

DANE. (2022). ***PIB por departamento.*** Recuperado de https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-departamentales

DANE. (2023). ***Indicadores del mercado laboral.*** Recuperado 3 mayo, 2023, de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/ech/ech/bol_empleo_2023.pdf

DANE. (6 de junio, 2022). P***royecciones de población.*** Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Obtenido de https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion

Dansgaard, W. (1964). Stable isotopes in precipitation. ***Tellus, 16(4)***, 436–468. doi:10.3402/tellusa.v16i4.8993

Davis, S.N. y Bentley, H.W. (1982). Dating Groundwater. ***Nuclear and Chemical Dating Techniques, 187 222. doi:10.1021***/bk-1982-0176.ch011

Departamento de Geografía, Universidad del Valle; Loaiza C., W.; Carvajal-Escobar, Y.; Andreoli de Souza, R. V.; Kayano, M. T. y González L., N. (2020). Spatio-temporal analysis of the droughts in Cali, Colombia and their primary relationships with the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) between 1971 and 2011. ***Atmósfera, 33(1)***, 51-69. https://doi.org/10.20937/ATM.52639

Dracup, J. A., Lee, K. S. y Paulson, E. G. (1980). On the definition of droughts. ***Water Resources Research, 16(2)***, 297-302. https://doi.org/10.1029/WR016i002p00297

Drought in Numbers 2022 - ***United Nations.*** (s. f.).

Efstratiadis, A. y Koutsoyiannis, D. (2010). Une décennie d'approches de calage multi-objectifs en modélisation hydrologique: Une revue. ***Hydrological Sciences Journal, 55(1)***, 58–78. https://doi.org/10.1080/02626660903526292

Ev'eaulution, Universidad de Montpellier y GSI-LAC (2018). ***Análisis de isótopos estables del agua para determinar el beneficio hídrico del páramo de Santurbán.*** Alianza Biocuenca.

EVA-UPRA. (s.f.). E***valuaciones Agropecuarias Municipales***. Recuperado de EVAs: https://upra.gov.co/es-co/Paginas/eva.aspx

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2000). ***New Dimensions in Water Security.*** Report AGL/MISC/25/2000. Roma: Naciones Unidas. División de Desarrollo de Tierra y Agua.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2011). ***Convenio de Rotterdam, so-***

***bre Procedimiento de Consentimiento Fundamentado Previo aplicable a ciertos plaguicidas y productos químicos peligrosos objeto de comercio internacional.*** Ginebra, Suiza: Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente (PNUMA).

FAO. (2013). ***Afrontar la escasez de agua. Un marco de acción para la agricultura y la Seguridad Alimentaria***. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (FAO).

FAO. (2021). Cuestionario Agua y Agricultura. ***Recopilación AQUASTAT de datos sobre el uso del agua para la agricultura y el desarrollo rural.*** Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

Fedesarrollo. (2020). ***Prospectiva económica Diciembre de 2020.*** Obtenido de www.fedesarrollo.org.co.

Flores M., F. (2000). Ventajas del aprovechamiento conjunto de aguas superficiales y subterráneas: el ejemplo de Madrid. En R. Fernández Rubio, J. Fernández Sánchez , B. López Camacho, y J. A. López Geta, ***Aguas subterráneas y abastecimiento urbano (p. 14)***. Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE).

Fonade y DNP (1985). ***Estudio Nacional de Aguas 1985.*** Resumen. Bogotá.

Fu, B., Merritt, W. S., Croke, B. F. W., Weber, T. R. y Jakeman, A. J. (2019). A review of catchment-scale water quality and erosion models and a synthesis of future prospects. ***Environmental Modelling & Software, 114,*** 75–97. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.12.008

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Michaelsen, J. et al. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. ***Scientific Data, 2.*** doi:10.1038/sdata.2015.66

García M. y Vargas N. (2013). ***Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia.*** Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam).

Gat, J.R. (2005). Isotope hydrology: A study of the water cycle. ***Series on Environmental Science and Management Vol. 6.*** Imperial College Press.

Guio R., C.A. y Rojas S., A. (2019). Amazonia colombiana. Dinámicas territoriales. ***Ideas verdes, 22.*** Fundación Heinrich Böll. Disponible en: https://co.boell.org/sites/default/files/2020-01/IDEAS%20VERDES%20web%20_1.pdf

Heaton, T. H. (1986). Isotopic studies of nitrogen pollution in the hydrosphere and atmosphere: A review. ***Chemical Geology: Isotope Geoscience Section, 59***, 87–102. doi:10.1016/0168-9622(86)90059-x

Henao A., G. L. (2021). Plaguicidas prohibidos y en vigilancia en el mundo y su estado en Colombia. ***Revista Semillas N° 75/76***, 37-42.

Herrera N., J., Rodríguez C., J., Coto C., J. M., Salgado S., V. y Borbón A., H. (2013). Evaluación de Metalers Pesados en los sedimentos superficiales del río Pirro. ***Tecnología en Marcha, Vol. 26***, N.°1, 27-36.

Hinderer, M. (2012). From gullies to mountain belts: A review of sediment budgets at various scales. ***Sedimentary Geology, 280***, 21–59. https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.03.009

Hoekstra, A., Chapagain, A., Aldaya, M. y Mekonnen, M. (2011). ***The water footprint assessment manual - Setting the global standard.*** London. Obtenido de https://waterfootprint.org/media/downloads/TheWaterFootprintAssessmentManual_2.pdf

Horton, R. E. (1933). The Role of infiltration in the hydrologic cycle. ***Transactions, American Geophysical Union, 14(1)***, 446. doi:10.1029/tr014i001p00446

Hoyos, I., Domínguez, F., Cañón-Barriga, J., Martínez, J. A., Nieto, R., Gimeno, L. y Dirmeyer, P. A. (2017). Moisture origin and transport processes in Colombia, northern South America. ***Climate Dynamics, 50(3-4),*** 971–990. doi:10.1007/s00382-017-3653-6

Hughes C.E., Crawford J. (2012). A new precipitation weighted method for determining the meteoric water line for hydrological applications demonstrated using Australian and global GNIP data. ***Journal of Hydrology, 464-465***, 42-55.

IAEA (1992). Statistical treatment of data on environmental isotopes in precipitation. ***Technical Report Series Nro. 331.*** IAEA.

IAEA (2013). ***Isotope methods for dating old groundwater.*** IAEA

IAEA (20 de agosto, 2019). ***Panorama de la hidrología isotópica.*** Gil, Laura y Ortega, Lucía. Obtenido de https://www.iaea.org/es/newscenter/news/panorama-de-la-hidrologia-isotopica

ICA (10 de abril, 2022). ***Censo Pecuario Nacional 2020.*** Obtenido de ICA.gov.co: https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018

ICA (2021). ***Comercialización de Fertilizantes y Acondicionadores de Suelos Año 2020.*** Bogotá: Instituto Colombiano Agropecuario. Dirección Técnica de Inocuidad e Insumos Agrícolas.

ICA (2021). ***Estadísticas de Comercialización de Plaguicidas Químicos de uso Agrícola 2020.*** Bogotá: Instituto Colombiano Agropecuario. Dirección Técnica de Inocuidad e Insumos Agrícolas.

ICBF (26 de abril, 2022). ***Plantas de beneficio y desposte.*** Obtenido de https://www.icbf.gov.co/

Ideam (2021). ***Informe del estado de los glaciares colombianos 2020.*** Bogotá D. C.

Ideam (2022). ***Informe del estado de los glaciares colombianos 2021***. Bogotá D. C.

Ideam e Invemar. (2017). ***Protocolo de Monitoreo del Agua.*** Bogotá D. C., Colombia: Ideam.

Ideam e Invemar. (2021). ***Protocolo de Monitoreo y Seguimiento del Agua.*** Bogotá D. C.: Ideam.

Ideam, SINA, PNN, MAVDT, IGAC (2007). ***Ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia.*** Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Ideam y ANH (2022). ***Línea Base General Ambiental en los componentes de aguas superficiales y subterráneas articulados.*** Centro de Transparencia PPII. Obtenido de https://www.centrodetransparenciappii.org/biblioteca-virtual/base-de-datos?combine=&field_document_componente_target_id%5B26%5D=26&field_document_componente_target_id%5B30%5D=30

Ideam, IAvH, Invemar e IGAC (2017). ***Memoria técnica. Mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia (MEC), escala 1:100.000.*** http://docu-

mentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023899/023899.html

Ideam, Instituto Sinchi y Parques Nacionales Naturales (PNN) (2021). ***Mapa Nacional de Coberturas de la Tierra. Escala 1: 100.000, periodo 2018.*** Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia.

Ideam. (1998). ***El medio ambiente en Colombia.*** (P. Leyva, Ed.) Bogotá D.C., Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Ideam. (2010). ***Estudio Nacional del Agua 2010.*** Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Strategy Ltda. doi:978-958-8067-32

Ideam. (2010). ***Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra.*** Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000.

Ideam. (2012). ***Glaciares de Colombia, más que montañas con hielo.*** Bogotá, D.C.

Ideam. (2013 modificado 2022). ***Zonificación y Codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia.*** Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Imprenta Nacional.

Ideam. (2013). ***Aguas subterráneas en Colombia: Una visión general.*** Bogotá D.C., Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Imprenta Nacional. doi: ISSN 2346-4720

Ideam. (2015). ***Estudio Nacional del Agua ENA 2014.*** Bogotá. Obtenido de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf

Ideam. (2015). ***Principios Básicos para el Conocimiento y Monitoreo de las Aguas Subterráneas en Colombia.*** Bogotá D.C: Ideam.

Ideam. (2017). ***Guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación.*** Ideam. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023774/023774.html

Ideam. (2018). ***Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica.*** Bogotá, D.C. ISBN: 978-958-5489-09-7

Ideam. (2019). ***Estudio Nacional del Agua 2018.*** Bogotá: Ideam.

IGAC. (14 de junio, 2005). ***Colombia: Mapa físico.*** Reliefweb. Recuperado el 1 de marzo, 2023, de https://reliefweb.int/organization/govt-colombia

IGME. (1987). ***Mapa de normas de explotación de acuíferos.*** Instituto Geológico y Minero de España. Recuperado de http://info.igme.es/SidPDF/018000/764/Mapa%20de%20normas%20de%20explotaci%C3%B3n%20de%20acu%C3%ADferos.

IIAP. (2013). ***Plan Estratégico de la Macrocuenca del Pacífico.*** Quibdó: Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico.

ICA (Instituto Colombiano Agropecuario). (2021). ***Restricciones, prohibiciones y suspensión de registros de plaguicidas de uso agrícola en Colombia.*** Subgerencia de Protección Vegetal, Bogotá, D.C.

Instituto Colombiano Agropecuario, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2014). ***Resolución 3497 de 2014.*** Por medio de la cual se establece el procedimiento para la revaluación de los plaguicidas químicos de uso agrícola, registrados con anterioridad a la entrada en vigencia de la Decisión CAN 436 y se establecen otras disposiciones., Bogotá, D.C.

International Agency for Research on Cancer., World Health Organization (2015). Evaluation of five organophosphate insecticides and herbicides. ***IARC monographs, volumen 112.*** Lyon, Francia.

Invemar. (2015). ***Informe del estado de los ambientes y recursos marinos y costeros en Colombia. Santa Marta.*** Obtenido de http://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/ier2014.pdf

Jahangir, M.M.R., Johnston, P., Khalil, M.J., Richards, K.G. (2012). Linking hydrogeochemistry to nitrate abundance in groundwater in agricultural settings in Ireland. ***J. Hydrol. 448–449,*** 212–222

Jasechko, S. (2019). ***Global isotope hydrogeology-Review.*** Reviews of Geophysics. doi:10.1029/2018rg000627

Jiao, Yuanmei; Liu, Chengjing; Gao, Xuan; Xu, Qiue; Ding, Yinping; Liu, Zhilin (2019). Impacts of moisture sources on the isotopic inverse altitude effect and amount of precipitation in the Hani Rice Terraces region of the Ailao Mountains. ***Science of The Total Environment, 687(1)***, 470–478. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.05.426

Jothiprakash, V. yVaibhav, G. (2008). Re-look to conventional techniques for trapping efficiency estimation of a reservoir. ***International Journal of Sediment Research, 23(1)***, 76–84.

Julien, P. Y., Saghafian, B. y Ogden, F. L. (1995). Raster-Based Hydrologic Modeling Of Spatially-Varied Surface Runoff. ***Journal of the American Water Resources Association, 31(3)***, 523–536. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1995.tb04039.x

Kalbus, E., Reinstorf, F. y Schirmer, M. (2006). Measuring methods for groundwater – surface water interactions: a review. ***Hydrology and Earth System Sciences, 10(6)***, 873–887. doi:10.5194/hess 10-873-2006

Kazemi, G.A., Lehr, J.H. y Perrochet, P. (2006). ***Groundwater age.*** Wiley-Interscience.

Kendall, C. y McDonell, J.J. (1998). ***Isotope tracers in catchment hydrology.*** Elsevier.

Kilinc, M. Y. y Richardson, E. v. (1973). Mechanics of soil erosion from overland flow generated by simulated rainfall. ***Hydrology Papers No. 63***, Colorado State University, Fort Collins, CO.

Krasovskaia, I., Gottschalk, L., Leblois, E. y Pacheco, A. (2006). Regionalization of flow duration curves. Climate Variability and Change. ***Hydrological Impacts, 308***:105-110. Habana, Cuba: IAHS.

Lasso, C. A., Gutiérrez, F., Morales B., M. A., Agudelo C., E., Ramírez-Gil, H., Ajiaco-Martínez, R. E. et al. (2011). ***II. Pesquerías continentales de Colombia: cuencas del Magdalena-Cauca, Sinú, Canalete, Atrato, Orinoco, Amazonas y vertiente del Pacífico.*** Bogotá D.C., Colombia: Instituto de Investigación de los Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Legendre P (2022). ***Model II Regression User's Guide.*** R Edition.

LeGrande, A. N.; Schmidt, G. A. (2006). Global gridded data set of the oxygen isotopic composition in seawater. ***Geophysical Research Letters, 33(12)***. doi:10.1029/2006gl026011

Lewandowski, J., Meinikmann, K. y Krause, S. (2020). Groundwater–Surface Water Interactions: Recent Advances and Interdisciplinary Challenges. ***Water, 12(1)***, 296. doi:10.3390/w12010296

MADS. (2017). ***Guía técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia.*** 1 128.

Martin Delgado, D. (2021). ***Indicador ODS 6.3.2. Proporción de masas de agua de buena calidad ambiental.*** Capacitación en la metadata. Panamá: ONU Programa para el medio ambiente.

MAVDT. (2010). ***Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico.*** Bogotá D.C., Colombia: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

McKee, T.; Doesken, N. y Kleist, J. (1993).The relationship of drought frequency and duration to time scales. ***Eighth Conference in Applied Climatology 1993.*** Anaheim, California.

Meisel R., A., Bonilla M., L., y Sánchez J., A. (2013). La serie Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional. ***Geografía económica de la Amazonia colombiana (Vol. 193).*** Cartagena de Indias, Colombia: Banco de la República - Sucursal Cartagena.

Merlivat, L. y Jouzel, J. (1979). Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation. ***Journal of Geophysical Research, 84(C8)***, 5029. doi:10.1029/jc084ic08p05029

MinAgricultura. (14 de 02 de 2021). ***El sector agropecuario fue la actividad económica que más creció en 2020 con una variación de 2,8%.*** Obtenido de https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/El-sector-agropecuario-fue-la-actividad-econ%C3%B3mica-que-m%C3%A1s-creci%C3%B3-en-2020-con-una-variaci%C3%B3n-de-2,8.aspx

MinAgricultura. (2019). ***Agronet - Evaluaciones Agropecuarias - EVA y Anuario Estadístico del Sector Agropecuario.*** Recuperado septiembre, 2022 de www.agronet.gov.co: https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=59

MinAmbiente (2015). ***Decreto 1076 de 2015*** (modificado por el Decreto 050 de 2018). https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/decreto-050-de-2018/

MinAmbiente. (2022). ***Lineamientos generales para el Manejo de sedimentos a nivel de cuenca hidrográfica en el marco de la Gestión Integral del Recurso Hídrico.*** MADS

Ministerio de Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). Decreto 1575 de 2007. Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano, Bogotá, D.C.

Ministerio de Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007a). ***Resolución 2115 de 2007.*** Por medio del cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para el consumo humano, Bogotá, D.C.

Ministerio de Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010 ). ***Resolución 4716 de 2010.*** Por medio del cual se reglamenta el parágrafo del artículo 15 del decreto 1575 de 2007, Bogotá, D.C.

Ministerio de Relaciones Exteriores. (3 de marzo, 2023). ***Fronteras terrestres.*** Recuperado de https://www.cancilleria.gov.co/politica/fronteras-terrestres.

Ministerio de Salud y Protección Social, Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). ***Resolución 549 de 2017.*** Por el cual se adopta la guía que incorpora los criterios y actividades mínimas de los estudios de riesgo, programas de reducción de riesgo y planes de contingencia de los sistemas de suministro de agua para consumo humano. Bogotá, D.C.

Ministerio de Salud y Protección Social. (2018). ***Decreto 2501 de 2018.*** Por el cual se determina la permanencia del reglamento técnico que regula el uso y manejo de plaguicidas, Bogotá, D. C.

Ministerio de Salud y Protección Social. (2022). ***Autodiagnóstico Direcciones Territoriales de Salud.*** MSPS, Subdirección de Salud Ambiental 2022. , Bogotá, D. C.

MinVivienda, MinSalud, INS y SSPD (2019). ***Informe Nacional de Calidad del Agua para Consumo Humano, INCA 2018.*** Bogotá: Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD).

MinVivienda, MinSalud, INS y SSPD (2021). ***Informe Nacional de Calidad del Agua para Consumo Humano, INCA 2020.*** Bogotá: Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD).

MinVivienda, MinSalud, INS y SSPD (2020). ***Informe Nacional de Calidad del Agua para Consumo Humano. INCA 2019.*** Bogotá: Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD).

MinVivienda. (2017). ***Resolución 0330.*** Bogotá: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

Morán-Tejeda, E., Ceballos, J. L., Peña, K., Lorenzo-Lacruz, J., y López-Moreno, J. I. (2018). Recent evolution and associated hydrological dynamics of a vanishing tropical Andean glacier: Glaciar de Conejeras, Colombia. ***Hydrol. Earth Syst. Sci., 22,*** 5445–5461, https://doi.org/10.5194/hess-22-5445-2018.

Mulu, A. y Dwarakish, G. S. (2015). Different Approach for Using Trap Efficiency for Estimation of Reservoir Sedimentation. An Overview. ***Aquatic Procedia, 4***:847–852.

Munera, H.A. (1974). Simplified mathematical models for interpreting the results of tests carried out by labelling the whole piezometric column in water wells. Instituto de Asuntos Nucleares, Bogota (Colombia). En: ***Isotope techniques in groundwater hydrology 1974, Vol. II.*** Proceedings of a symposium.

Naciones Unidas - Programa para el Medio Ambiente (2021). ***Progresos en la calidad de las aguas ambientales: Novedades sobre el indicador mundial 6.3.2 y necesidades de aceleración 2021.*** (Serie de seguimiento de los avances para la consecución del ODS 6) Nairobi.

Naciones Unidas. (2016). ***Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.*** Nueva York.

NASA. (2013). ***Shuttle Radar Topography Mission*** (SRTM) Global. doi:https://doi.org/10.5069/G9445JDF

OIEA (2014). ***Guía para el muestreo de la precipitación OIEA/GNIP. Versión 02.*** Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP).

OMM. (2012). ***Glosario Hidrológico Internacional. Vol. 385*** WMO.

OMS (1993). ***Economopoulos, A. Assessment of Sources of air, water, and land pollution. Part ONE: Rapid Inventory Techniques in Environmental Pollution.*** Ginebra: Organización Mundial de La Salud.

OMS (2018). ***Guías para la calidad del agua de consumo humano:*** Cuarta edición que incorpora la primera adenda. Geneva: Organización Mundial de la Salud.

OMS (2020). ***The WHO recommended classification of pesticides by hazard and guidelines to classification 2019.*** Geneva: World Health Organization.

OMS y FAO. (2019). Global situation of pesticide management in agriculture and public health. ***Report of a 2018 WHO–FAO survey.*** Geneva: World Health Organization & Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Ordoñez Gálvez, J. J. (2011). ***Global Water Partnership - South America.*** Obtenido de Foro Peruano del Agua: https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/aguas_subterraneas.pdf

OTCA (2017). ***Análisis Diagnóstico Transfronterizo Regional de la Cuenca Amazónica ADT.*** Brasilia: ONU medio ambiente.

OTCA, PNUMA y GEF. (2016). ***Estrategia Regional para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la Cuenca Amazónica.*** Brasilia: Organización del Tratado de Cooperación Amazónica OTCA.

Otero C., A. (2013). Serie ***Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional. Río Ranchería: Entre la economía, la biodiversidad y la cultura.*** Cartagena de Indias, Colombia: Banco de la República - Sucursal Cartagena.

Palacio, P. A. y Betancur, T. (2007). Identificación de fuente y zonas de recarga a un sistema acuífero a partir de isótopos estables del agua. Caso de estudio Bajo Cauca Antioqueño. ***Gestión y Ambiente (10)1***, 167-181. Universidad Nacional de Colombia.

Peña, J. G. 2020. ***Modelación hidrológica en la cuenca del Lago de Tota.*** Bogotá, D.C. AICCA, GEF, CAF, CONDESAN, Minambiente, Ideam. Disponible en https://condesan.org/recursos/modelacion-hidrologica-la-cuenca-del-lago-tota/

Planet Gold Colombia. (s.f.). ***Planet Gold Colombia.*** Recuperado 28 de noviembre, 2022, en https://gmarquin.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=ff2fc8a1093a4240a2741fbdc01175c9

PNUMA. (2020). ***Una introducción al indicador 6.3.2 de los ODS: Proporción de masas de agua de buena calidad.*** Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).

Poage, M.A. y Chamberlain, C.O. (2001). Empirical relationships between elevation and the stable isotope composition of precipitation and surface waters: considerations for studies of paleoelevation change. ***American Journal of Science, 301(1)***, 1–15. doi:10.2475/ajs.301.1.1

Poveda G. y Mesa O.J. (2000). On the existence of Lloró (the rainiest locality on Earth): Enhanced ocean-land-atmosphere interaction by a low-level jet. ***Geophysical Research Letters, 27(11)***, 1675–1678. doi:10.1029/1999gl006091

Poveda G.; Jaramillo L. y Vallejo L.F. (2014). Seasonal precipitation patterns along pathways of South American low-level jets and aerial rivers. ***Water Resources Research, 50(1),*** 98–118. doi:10.1002/2013wr014087

Presidencia de la República de Colombia. (1991). ***Decreto 1843 de 1991.*** Por el cual se reglamenta parcialmente los títulos III, V, VI, VII y XI de la Ley 09 de 1979, Sobre uso y manejo de plaguicidas. Santa Fe de Bogotá, D.C., 22 de julio de 1991, Bogotá, D.C.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2021). ***Progresos en la calidad de las aguas ambientales.*** Serie de seguimiento de los avances para la consecución del ODS 6: Novedades sobre el indicador mundial 6.3.2 y necesidades de aceleración. Nairobi: Naciones Unidas.

Pure Earth Black Smith Institute (s.f.). ***Toxic Sites Identification Program.*** Recuperado el 28 de noviembre de 2022 de https://www.contaminatedsites.org/

Putman A. L., Fiorella, R. P., Bowen, G. J., Cai, Z. (2019). A global perspective on local meteoric water lines: Meta-analytic insight into fundamental controls and practical constraints. ***Water Resources Research, 55***, 6896–6910. https://doi.org/10.1029/2019WR025181

Rabatel, A., Ceballos, J. L., Micheletti, N., Jordan, E., González, J., , C. et al. (2018). Toward an imminent extinction of Colombian glaciers? Geografiska Annaler: Series A, ***Physical Geography, 100:1***, 75-95, DOI: 10.1080/04353676.2017.1383015

Ramírez, M., Farías, C., Zúñiga, L., Sandoval, R., Roeleveld, N., Van der Velden, K. et.al. (2018). Biomonitoring of blood cholinesterases and acylpeptide hydrolase activities in rural inhabitants exposed to pesticides in the Coquimbo Region of Chile. ***PLoS One, 2: 13***(5:e0196084).

Rangel, R., Alejandro, R., Acuña, P., Naranjo, B., Agustín, J., Yamanaka, A. y Hugo, V. (2017). ***Monitorización de sequías en México a través del índice estandarizado multivariado de sequía. 9.***

Ravazi, T. y Coulibaly, P. (2013). Classification of Ontario watersheds based on physical attributes and streamflow series. ***Journal of Hydrology, 493***, 81-94. doi:https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.04.013

Rivera Ospina, D. y Silva Álvarez, L. Á. (2015). ***Colombia naturaleza en riesgo.*** Cali, Colombia: I/M Editores. Obtenido de https://www.imeditores.com/banocc/naturiesgo/

Rivett, M. O., Buss, S. R., Morgan, P., Smith, J. W. N. y Bemment, C. D. (2008). Nitrate attenuation in groundwater: A review of biogeochemical controlling processes. ***Water Research, 42(16)***, 4215 4232. doi:10.1016/j.watres.2008.07.020

Romero Vargas, M. J. (2020). ***Retos y desafíos en la implementación de técnicas de manejo de sedimentos en embalses de Colombia.*** (Proyecto de Grado en Ingeniería Ambiental). Bogotá D.C.: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería civil y ambiental.

Rozanski, K. y Araguás A., L (1995). Spatial and temporal variability of stable isotope composition of precipitation over the South American continent. En: ***Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines, 24(3)***. Eaux, glaciers & changements climatiques dans les Andes tropicales, 379 390.

Rozanski, K., Froehlich, K. y Mook, W.G. (2001). ***Environmental isotopes in the hydrological cycle. Principles and applications. Volume III: Surface water.*** IAEA – Unesco.

Rozanski,K., Araguás-Araguás, L. y Gonfiantini,R. (1993). Isotopic patterns in modern global precipitation. En ***Climate change in continental isotopic records, Geophysical Monograph Series, (78).*** Washington, DC: American Geophysical Union. https://doi.org/10.1029/GM078p0001

Sakamoto, Meiry Sayuri; Ambrizzi, Tércio; Poveda, Germán (2011). Moisture Sources and Life Cycle of Convective Systems over Western Colombia. ***Advances in Meteorology, 2011,*** 1–11. doi:10.1155/2011/890759

Schotterer, U., Oldfield, F. y Froehlich, K. (1996). ***GNIP Global Network for Isotopes in Precipitation.*** Suiza: Laederach AG.

Servicio Geológico Colombiano (SGC). (Junio, 2022). ***Generación de conocimiento hidrogeológico que permita establecer la ocurrencia, origen y conexión entre los flujos de agua subterránea de la cuenca alta de las quebradas La Baja y Angostura con el Páramo de Santurbán mediante técnicas hidrogeológicas.*** Recuperado el 26 de enero de 2023, de https://miig.sgc.gov.co/Paginas/RegistroInformacion.aspx

SGC. (2022). ***simma.*** Disponible en https://www2.sgc.gov.co/ProgramasDeInvestigacion/geoamenazas/Paginas/Inventario-nacional-de-movimientos-en-masa-y-SIMMA.aspx

Skiba, U. (2008). ***Denitrification. Encyclopedia of Ecology***, 866–871. doi:10.1016/b978-008045405-4.00264-0

Sophocleous, M. (2002). Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. ***Hydrogeology Journal, 10(1),*** 52–67. doi:10.1007/s10040-001-0170-8

SSPD. (2021). ***Informe Nacional de los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo 2020.*** Bogotá D.C.: Superintendencia de Servicios Públicos domiciliarios. Recuperado el 2 de marzo de 2023, de https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/informe_nacional_de_coberturas_de_los_servicios_publicos_aaa_2020

Stichler, W. y Hermann, A. (1978). Verwendung von Sauerstoff-Messungen für hydrologische Bilanzierungen. ***Deutsche Gewässerkundliche Mitt. 22, Heft 1***: 9-13.

Stock, R. (2013). ***Encyclopedia of Nuclear Physics and its Applications.*** Wiley-VCH

Suckow, A. (2014). The age of groundwater. Definitions, models and why we do not need this term. ***Applied Geochemistry, 50***, 222–230. doi:10.1016/j.apgeochem.2014.04.016

Svoboda, M. D.; LeComte, D.; Hayes, M.; Heim, R.; Gleason, K.; Angel, J.; Tinker, R, et al. (2002). ***The Drought Monitor. Drought Mitigation Center Faculty Publications. 166.*** https://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpub/166

UN Water. (8 de mayo, 2013). ***Water Security & the Global Water Agenda.*** UN-Water. https://www.unwater.org/publications/water-security- global-water-agenda/

UN Water. (2022a). UN-Water Iniciativa de Monitoreo Integrado para el ODS 6. Obtenido de ***Indicador 6.3.2 "Proporción de cuerpos de agua con buena calidad del agua ambiental"***. https://www.unwater.org/our-work/integrated-monitoring-initiative-sdg-6/indicator-632-proportion-bodies-water-good-ambient

UN Water. (2022b). UN-Water Iniciativa de Monitoreo Integrado para el ODS 6. Obtenido de ***Indicador 6.4.1 "Cambio en la eficiencia del uso del agua a lo largo del tiempo"***. https://www.unwater.org/our-work/integrated-monitoring-initiative-sdg-6/indicator-641-change-water-use-efficiency-over-time

UN Water. (2022c). UN-Water Iniciativa de Monitoreo Integrado para el ODS 6. Obtenido de ***Indicador 6.4.2 "Nivel de estrés hídrico: extracción de agua dulce como proporción de los recursos de agua dulce disponibles".*** https://www.unwater.org/our-work/integrated-monitoring-initiative-sdg-6/indicator-642-level-water-stress-freshwater

UN Water. (2022d). UN-Water Iniciativa de Monitoreo Integrado para el ODS 6. Obtenido de ***Indicador 6.5.2 "Proporción del área de***

***la cuenca transfronteriza con un arreglo operativo para la cooperación en materia de agua"***. https://www.unwater.org/our-work/integrated-monitoring-initiative-sdg-6/indicator-652-proportion-transboundary-basin-area

UNDRR y CRED. (2020). ***Human Cost of Disasters: An overview of the last 20 years 2000-2019.*** United Nations. https://www.undrr.org/publication/human-cost-disasters-overview-last-20-years-2000-2019

Unesco y OMM. (2012). ***International Glossary of Hydrology.*** Obtenido de Unesco- Programa Hidrológico Internacional : https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2013/11/GlosarioHidrologicoInternacional.pdf

Unesco. (2017). Sistemas Acuíferos Transfronterizos en la Américas – Evaluación Preliminar. ***Vol. Serie ISARM Américas Nro. 1.*** doi:ISBN 92-9089-101-7

UNGRD. (2017). ***Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos Amenazantes.*** Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo SNGRD. https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/20761/Terminologia-GRD-2017.pdf

UNGRD.(2021).***Consolidadoreportedeemergencias 1998-2021.*** https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Consolidado-Atencion-de-Emergencias.aspx

United Nations Environment Programme (2019). ***Global Chemicals Outlook II - From Legacies to Innovative Solutions: Implementing the 2030 Agenda for Sustainable Development.*** UNEP Publications.

United Nations Environment Programme (UNEP) y GRID-Arendal (2020). ***The Illegal Trade in Chemicals.*** ISBN: 978-92-807-3783-7.

United States Environmental Protection Agency. (2018). ***EPA Settles with Amazon for Distributions of Illegal Pesticides.*** https://www.epa.gov/newsreleases/epa-settles-amazon-distributions-illegal-pesticides.

Universidad EAFIT. (2021). ***Sobre Colombia. Generalidades.*** Recuperado de https://www.eafit.edu.co/vivirenmedellin/sobre-colombia/Paginas/sobre-colombia.aspx#

UNODC (2021). ***Monitoreo de territorios afectados por cultivos ilícitos 2020.*** Bogotá: Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC).

UNODC. (2022). Sistema Integrado de Monitoreo de Cultivos Ilícitos (SIMCI). ***Monitoreo de territorios afectados por cultivos ilícitos 2021.*** Bogotá D. C.: Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito.

Van Dyk, J.S. y Pletschke, B. (2011). Review on the use of enzymes for the detection of organochlorine, organophosphate and carbamate pesticides in the environment. ***Chemosphere, , 82(3)***: 291–307.

Vásquez C., A., Bustamante Z., C., Buitrago, A., Baptiste, B., Echeverri, J. (2019). ***El gran libro de la Orinoquia colombiana.*** Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. doi:978-958-5418-29-5

Villegas, P., Paredes, V., Betancur, T., Taupin, J. D. y Toro, L. E. (2018). Groundwater evolution and mean water age inferred from hydrochemical and isotopic tracers in a tropical confined aquifer. ***Hydrological Processes, 32(14)***, 2158–2175. doi:10.1002/hyp.13160

Villegas, P. (2013). ***Caracterización isotópica del acuífero del Golfo de Urabá, utilizando 2H, 18O, 14C y 13C*** [Tesis de maestría en Ingeniería]. Universidad de Antioquia.

Viloria de la Hoz, J. (2009). La Serie Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional. ***Geografía económica de la Orinoquia (Vol. 113)***. Cartagena de Indias, Colombia: Banco de la República - Sucursal Cartagena.

Vimeux F.; Tremoy G.; Risi C.; Gallaire R. (2011). A strong control of the South American SeeSaw on the intra-seasonal variability of the isotopic composition of precipitation in the Bolivian Andes. ***Earth and Planetary Science Letters, 307(1-2)***, 0–58. doi:10.1016/j.epsl.2011.04.031

Waliser, D. E.; Gautier, C. (1993). A Satellite-derived Climatology of the ITCZ. ***Journal of Climate, 6(11)***, 2162–2174. doi:10.1175/1520-0442(1993)006<2162:ASDCOT>2.0.CO;2

Ward, M.H., deKok, T.M., Levallois, P., Brender, J., Gulis, G., Nolan, B.T. (2005). Workgroup report: drinking water nitrate and health. Recent findings and research needs. ***Environ. Health Perspect. 113***, 1607–1614.

Weinberg, J. (2009). ***Guía para las ONG sobre los Contaminantes Orgánicos Persistentes.*** Marco para las medidas de protección de la salud humana y el medio ambiente de los Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP). India.

Wilkinson, S. N., Prosser, I. P. y Hughes, A. O. (2006). Predicting the distribution of bed material accumulation using river network sediment budgets. ***Water Resources Research, 42(10)***, 1–17. https://doi.org/10.1029/2006WR004958

Wilkinson, S. N., Prosser, I. P., Rustomji, P. y Read, A. M. (2009). Modelling and testing spatially distributed sediment budgets to relate erosion processes to sediment yields. ***Environmental Modelling and Software, 24(4),*** 489–501. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.09.006

WMO. (2021). The Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes (1970–2019). ***WMO-No. 1267.*** World Meteorological Organization (WMO).

Zárate, C. R. (2018). ***Plan de Manejo del Parque Nacional Natural Sierra de la Macarena.*** Parques Nacionales Naturales de Colombia. Obtenido de https://www.parquesnacionales.gov.co/portal/wp-content/uploads/2020/10/plan-de-manejo-pnn-sierra-de-la-macarena.pdf

Zhang, L., Potter, N., Hickel, K., Zhang, Y. y Shao, Q. (2008). Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework – Model development and testing. ***Journal of Hydrology, 360(1-4),*** 117-131. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.021

# ESTUDIO NACIONAL DEL AGUA 2022

Ambiente

IDEAM