



PROTOCOLO DE MONITOREO Y SEGUIMIENTO DEL ESTADO DE LOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS DE COLOMBIA - PROMSEA



Fenómenos de transformación: carga contaminante, fragmentación y cambio climático





Protocolo de Monitoreo y Seguimiento del Estado de los Ecosistemas Acuáticos de Colombia - Promsea

Fenómenos de transformación: carga contaminante, fragmentación y cambio climático

Gustavo Francisco Petro Urrego

Presidente de la República de Colombia

Francia Márquez Mina

Vicepresidenta de la República de Colombia

Irene Vélez Torres

Ministra de Ambiente y Desarrollo Sostenible (e)

Edith Bastidas Calderón

Viceministra de Políticas y Normalización Ambiental

Luz Dary Carmona Moreno

Viceministra de Ordenamiento Ambiental del Territorio (e)

Ghisliane Echeverry Prieto

Directora general

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

Raymond Alexander Jiménez Arteaga

Subdirector de Ecosistemas e Información Ambiental

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

Consejo Directivo Ideam

Luz Dary Carmona Moreno

Viceministra de Ordenamiento Ambiental del Territorio (e)

Paola Ricaurte Ayala

Asesora de la Dirección de Ambiente y Desarrollo Sostenible - Departamento Nacional de Planeación (DNP)

Elkin Ernesto Ramírez Niño

Director técnico de la Dirección Técnica Geoestadística - Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE)

Giovannys Medrano Martínez

Director general - Corporación para el Desarrollo Sostenible de La Mojana y el San Jorge (Corpomojana)

Liliana María Ospina Arias

Viceministra de Infraestructura (representación de la ministra de Transporte)

Directivas Ideam

Ghisliane Echeverry Prieto

Directora general

Jennifer Dorado Delgado

Jefe de Oficina del Servicio
de Pronóstico y Alertas

Juan Fernando Acosta Mirkow

Secretario general

Olga Marcela Vargas Valenzuela

Jefe de Oficina Asesora de Planeación

Raymond Alexánder Jiménez Arteaga

Subdirector de Ecosistemas e Información Ambiental

Miguel Ángel Ayala Tovar

Coordinador del Grupo de Comunicaciones y Prensa

Elizabeth Patiño Correa

Subdirectora de Estudios Ambientales

Wilmer Espitia Muñoz

Jefe de Oficina de Informática

Fabio Andrés Bernal Quiroga

Subdirector de Hidrología

Gilberto Antonio Ramos Suárez

Jefe de Oficina Asesora Jurídica

Diana Carolina Rueda Dimate

Subdirectora de Meteorología

Adriana María Ocampo Loaiza

Jefe de Oficina de Control Interno

Equipo técnico

Autoras y equipo coordinador

Liz Johanna Díaz Cubillos

Claudia Patricia Andramunio-Acero

María Juliana Salcedo Hernández

Lina María Parada Alzate

Colaboración en edición

Mónica Tatiana López Muñoz

María Camila Morales Pulido

Cartografía

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios
Ambientales (Ideam)

Lina María Parada Alzate

Proyecto Conservación y uso sostenible de la Ciénaga Grande de Santa Marta (CO-G1014)

Coordinadora general del proyecto

Anny Paola Zamora

Profesional de Gestión Ambiental

Johana Cárdenas Rodríguez

Coordinador del componente de Fortalecimiento de la Gobernanza Ambiental

Héctor Martínez

Profesional Social

Yuranis Martínez

Coordinadora del componente de Áreas protegidas, Conectividad Ecológica y Manejo del Agua

Hila Yalit Rodríguez

Profesional de Planificación y Seguimiento

Sergio Real Rodríguez

Coordinador del componente de Uso Sostenible del Suelo y Conservación de Bosques

Albeiro Rosero Guerrero

Profesional financiero

Rosa Morón Jaraba

Profesional de Comunicaciones y Gestión del Conocimiento

Rosa Morón Jaraba

Profesional de adquisiciones

Yaritza López Urbaneja

Aportes conceptuales, metodológicos y de información

Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés (Invemar)

Carolina García Valencia

Diana Isabel Gómez

Janet Vivas Aguas

Julián José Pizarro Pertuz

Fabián David Escobar Toledo

Apoyo proceso editorial

Isabela Katime Arroyave

Jefe de Comunicación Científica - Invemar

Grupo de trabajo por componente

Hidrológico e hidrobiológico: Claudia Patricia Andramunio-Acero

Físico y socioeconómico: María Juliana Salcedo Hernández

Sistemas de Información Geográfica: Lina María Parada Alzate

Geomorfología y suelos: Raúl Páez Mendoza y Fredy Hernando Neira Méndez

Estadística: Edwin Andrés Cruz, Katherine Sánchez Casas y Wilson Galindo Bernal

Coordinación y compilación: Claudia Patricia Andramunio-Acero

Liderazgo y Supervisión: Liz Johanna Díaz Cubillos

Aportes conceptuales, metodológicos y de información

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Luis Francisco Camargo Fajardo

Óscar Hernán Manrique Betancourt

Jormmy Maritza Machado Hernández

Gina Carolina Avella Castiblanco

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)

Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental

Reinaldo Sánchez López

Nidia Cristina Mayorga Ulloa

Natalia Esperanza Córdoba Camacho

Magda Mallén Sierra Urrego

Diana Patricia Ramírez Aguilera

Yohanna Yacqueline Rojas Sánchez

Daniel Gama Beltrán

Javier Otero García

Indira Paola Pachón Cendales

Jorge Luis Ceballos Liévano

Subdirección de Hidrología

Nelson Omar Vargas Martínez

Fabio Andrés Bernal Quiroga

José Hernando Wilches Suárez

Nelsy Verdugo Rodríguez

Jenny Paola Marín Salazar

Claudia Nicol Tetay Botía

Claudia María Ávila Laverde

Aura María Bustillo Mendoza

José Ville Junior Triana García

Subdirección de Estudios Ambientales

Leonardo Alfredo Pineda Pardo

Yamile Andrea Moreno Saboya

Juan David Turriago García

Julián Darío Guerrero Otero

Carlos Felipe Torres Triana

Subdirección de Meteorología

Hugo Armando Saavedra Umba

Eliana Katherine Fonseca Gutiérrez

José Andrés Pineda Castañeda

**Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras
José Benito Vives de Andrés (Invemar)**

Carolina García Valencia
Diana Isabel Gómez
Janet Vivas Aguas
Julián José Pizarro Pertuz
Fabián David Escobar Toledo

**Instituto de Investigaciones Ambientales del
Pacífico (IIAP)**

Lady Vargas Porras

**Instituto Amazónico de Investigaciones
Científicas (Sinchi)**

Marcela Núñez-Avellaneda
Edwin Agudelo Córdoba
Natalia Carolina Castillo Barrera
Andrés Felipe Forero Huertas
Delio Mendoza Hernández

**Instituto de Investigación de Recursos Biológicos
Alexander von Humboldt (Instituto Humboldt)**

Angélica María Batista Morales
Margarita María Roa Cubillos

**Autoridad Nacional de Licencias Ambientales
(Anla)**

Omar Fernando Velandia
Ludy Nataly Forero Gómez
William Alfredo Pabón Botello
Camilo Andrés Bernal Forero
Nataly Andrea García Gil

**Parques Nacionales Naturales de Colombia
(PNN)**

Margarita Rozo Melo
Viviana Urrea Minota
Betsy Rocío Pedraza Suárez

**Autoridad Nacional de Pesca y Acuicultura
(Aunap)**

Carlos Guillermo Barreto Reyes
Olga Lucía Lara Quintero

**Fundación Natura; Proyecto GEF Magdalena-
Cauca Vive**

Juan Carlos Alonso González
Ana Cevalyn León Rincón
Lyda Amparo Cruz Méndez
Mónica Tatiana López Muñoz
Gabriel Antonio Pinilla
Juan David Serna Arbeláez
Astrid Tatiana Romero Martínez
Federico Mosquera Guerra

**Consortio para el Desarrollo Sostenible de la
Ecorregión Andina (Condesan). Proyecto de
Adaptación a los Impactos del Cambio Climático
en los recursos hídricos de los Andes – cuenca
Iago de Tota (Aicca)**

Miguel Fernando Vera-Lugo
María Carolina Obando Vargas
Luz Helena Hernández Hilarión
Paola Andrea Pérez Lora

Fotografías

Claudia Patricia Andramunio-Acero

María Juliana Salcedo Hernández

Johan Andrés Luna

Lina María Parada Alzate

Liz Johanna Díaz Cubillos

Fotografía de carátula

Gambote - Bolívar, Johan Andrés Luna

Coordinación editorial

Andrés Felipe Tapiero Ríos

Grupo de Comunicaciones y Prensa - Ideam

Apoyo revisión de pruebas

Fabián Andrés Gullaván

Grupo de Comunicaciones y Prensa - Ideam

Apoyo proceso editorial

Isabela Katime Arroyave

Jefe de Comunicación Científica (CMC) - Invemar

Diseño editorial y diagramación

Nataly Guzmán Guzmán (Ediprint S. A. S.)

Alejandro Sepúlveda Gauer

Grupo de Comunicaciones y Prensa - Ideam

Corrección de estilo

Erlí Margarita Marín Aranguren (Ediprint S. A. S.)

Apoyo logístico

John Khatib (Ediprint S. A. S.)

Cítese como:

Andramunio Acero, C. P., Salcedo Hernández, M. J., Parada Alzate, L. M. y Díaz Cubillos, L. J. (2026). *Protocolo de monitoreo y seguimiento del estado de los ecosistemas acuáticos de Colombia - Promsea: Fenómenos de transformación: carga contaminante, fragmentación y cambio climático*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (Ideam)

ISBN (digital): 978-958-5489-48-6

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

Calle 25 D No. 96 B - 70 - Bogotá, D. C.

PBX: +57 (601) 352 7160

contacto@ideam.gov.co

Publicación aprobada por el Ideam, Bogotá D.C., Colombia. Abril de 2026.



Sucre - Compendio Mojana

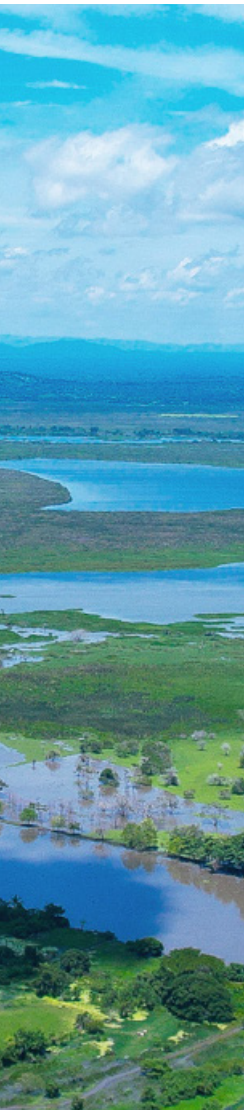
Agradecimientos

A todos los expertos, profesionales e instituciones del nivel nacional, regional y local que participaron en los diversos espacios y mesas convocadas y desarrolladas para la elaboración de este protocolo: talleres, encuestas, entrevistas, reuniones y mesas de trabajo, entre otros. Gracias por sus valiosos aportes.

Agradecimiento especial a los proyectos GEF: Adaptación a los Impactos del Cambio Climático en los recursos hídricos de los Andes (Aicca), Magdalena-Cauca Vive y Conservación y Uso Sostenible de la Ciénaga Grande de Santa Marta con sus implementadores y ejecutores respectivos, que con su contribución a la elaboración y publicación de este protocolo, han aportado al fortalecimiento de los procesos de gestión del conocimiento y monitoreo de los ecosistemas acuáticos que constituyen el patrimonio ambiental del país, bajo una óptica interinstitucional e integral.

Igualmente, agradecemos al Comité Directivo del Ideam, a la directora general, Ghislaine Echeverry, y al subdirector de Ecosistemas e Información Ambiental, Raymond Jiménez, cuyo apoyo en la gestión ha sido fundamental para la publicación de este documento. También, al equipo de profesionales y contratistas del Grupo de Suelos y Tierras y el Grupo SIA de la Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental por el apoyo y aporte técnico.

Asimismo, expresamos nuestra gratitud a Edith González Afanador y Ana Celia Salinas, quienes, durante su gestión como subdirectoras de Ecosistemas e Información Ambiental en el Ideam, promovieron la consolidación del equipo de trabajo y dieron impulso al inicio de los procesos de monitoreo de ecosistemas acuáticos, contribuyendo así al cumplimiento de la misión institucional del Ideam.





Cuenca río Cauca





Contenido

Listado de figuras	20
Listado de tablas.....	24
Índice de siglas / Acrónimos	28

1. Introducción

37

Objetivos por componente de desarrollo	40
Componente hidrológico	41
Componente hidrobiológico	41
Componente físico.....	41
Componente socioeconómico.....	41
Alcance	41
Fases de elaboración del Promsea	44
Fase I: Identificación de bases técnicas, conceptuales y metodológicas	44
Fase II: Documento Promsea.....	45
Fase III. Consolidación de la estrategia de implementación y validación del Promsea.....	46
Fase IV. Socialización, oficialización y lanzamiento	46
Actores	46
¿Cómo leer esta herramienta?.....	52
Marco técnico conceptual.....	52
Ecosistema	53
Ecosistema acuático	53
Ecosistema acuático marino costero.....	53
Ecosistemas acuáticos continentales.....	54
Ecosistemas lóticos	54
Ecosistemas lénticos	55
Ecosistemas transicionales (humedales).....	56
Ecosistemas Artificiales (embalses).....	56
Área hidrográfica.....	57
Cuenca.....	57

*Canal del Dique
- Caño Correa.
María la Baja -
Bolívar*

Estado	57
Monitoreo	58
Seguimiento	58

2. Contexto **6**

Contexto internacional	62
Contexto Nacional	64
Normativa.....	66
Programas nacionales de monitoreo.....	68

3. Diagnóstico **73**

Caracterización de las áreas hidrográficas del país	74
Área hidrográfica Caribe	74
Área hidrográfica Magdalena-Cauca	74
Área hidrográfica Orinoco.....	75
Área hidrográfica Amazonas.....	75
Área hidrográfica Pacífico.....	76
Actores institucionales	77
Entidades estatales nacionales.....	77
Entidades estatales regionales.....	78
Actores privados y organizaciones no gubernamentales (ONG).....	85
Academia.....	89
Principales presiones sobre los ecosistemas acuáticos del país	92
Demanda hídrica.....	94
Contaminación orgánica e inorgánica	95
Presiones puntuales por área hidrográfica	109

4. Planeación del monitoreo **113**

Definición de variables a monitorear	114
Zonificación	132

Fase 1 – Recopilación de la información geográfica.....	133
Fase 2 – Evaluación Multicriterio (EMC), creación de matriz de comparación de criterios y la normalización.....	133
Preparación de la fase 3: insumos y variables para la superposición ponderada de criterios.....	135
Fase 3 – Superposición ponderada de criterios.....	145

Insumos y procesos metodológicos para el monitoreo de los ecosistemas acuáticos, a partir de imágenes con sensores remotos...146

5. Monitoreo de los fenómenos de transformación priorizados

163

Monitoreo de la carga contaminante, orgánica e inorgánica, en ecosistemas acuáticos	165
Propuesta metodológica para evaluar la carga contaminante.....	167
Índices de contaminación.....	170
Monitoreo de contaminantes emergentes.....	171
Monitoreo de floraciones y clorofila a.....	174
Monitoreo de plantas acuáticas y semiacuáticas.....	178
Índices de condición para otras comunidades hidrobiológicas.....	180
Monitoreo de variables geomorfológicas y suelos	186
Plásticos y microplásticos	188
Monitoreo de la fragmentación en ecosistemas acuáticos	189
Propuesta metodológica para el monitoreo de la fragmentación.....	190
Índice de fragmentación	192
Índice de continuidad de Vogelmann.....	194
Índice de Densidad (PD).....	196
Modelo HEC-RAS.....	197
Índices de migraciones de especies basados en modelos de desplazamiento	198
Indicadores de fragmentación causada por obras de infraestructura....	201
Métodos propuestos para el análisis de fragmentación en campo, a partir de variables de suelos	202
Monitoreo del cambio climático en ecosistemas acuáticos.....	203
Monitoreo de emisiones de GEI y efectos del cambio climático en ecosistemas acuáticos.....	204
Enfoque de mitigación	204
Enfoque de adaptación	216

Sistemas de información ambiental para la evaluación del estado de los ecosistemas acuáticos	227
Información dispuesta en los sistemas y otras fuentes de información.....	229
Necesidades y proyección	236

6. Hoja de Ruta para la implementación del Promsea en ventanas piloto 243

Consolidación de la estrategia de implementación y validación del protocolo, a nivel regional y nacional.....	245
Priorización de las unidades de análisis (subzonas hidrográficas y unidades ambientales costeras) para la implementación y validación del Promsea.....	246
Criterios para la priorización de unidades de análisis: subzonas hidrográficas y unidades ambientales costeras.....	247
Modelo de integración de criterios para priorización de unidades de análisis.....	265
Análisis de presiones indirectas: clasificación socioeconómica de las unidades de análisis	266
Insumos existentes para la clasificación	266
Metodología de análisis para la clasificación socioeconómica de las subzonas hidrográficas y unidades ambientales costeras del país.....	271
Limitaciones de la hoja de ruta metodológica.....	274
Revisión y análisis de la información para la selección de ventanas piloto en las unidades de análisis priorizadas.....	275
Pasos mínimos para la selección de ventanas piloto para el monitoreo, en las unidades de análisis priorizadas.....	276
Pasos mínimos para la implementación del Promsea, en la ventana piloto seleccionada.....	277
Consideraciones para el análisis estadístico de la información, la construcción del marco geoestadístico y la generación del índice, en el marco del proceso de implementación y validación del Promsea	279
Actores y acuerdos institucionales para la implementación y validación nacional y regional del Promsea	292
Identificación preliminar de posibles ventanas piloto de implementación del Promsea.....	292

7. Variables complementarias: la importancia de la regionalización para el monitoreo de los ecosistemas acuáticos

297

La zonificación hidrográfica como punto de partida para la regionalización	299
Propuesta de ruta metodológica para la regionalización de variables, índices e indicadores mínimos desde el componente de geomorfología y suelos para el monitoreo de los ecosistemas acuáticos del país.....	302
Zonificación.....	303
Consideraciones para la regionalización de los ecosistemas acuáticos a partir de comunidades hidrobiológicas.....	305
Hoja de ruta para la generación de índices a partir de las comunidades hidrobiológicas, teniendo en cuenta la regionalización y su relación con otros componentes de los ecosistemas acuáticos.....	307

8. Adopción de protocolos y metodologías para el monitoreo y seguimiento

315

9. Salvedades y recomendaciones para el uso del Promsea

323

Componente físico	325
Geomorfología y suelos	325
Sistemas de Información Geográfica.....	326
Componente hidrológico	329
Componente Hidrobiológico.....	330
Componente socioeconómico	331
Proceso estadístico.....	333
Ruta de implementación y validación	334

Referencias

336



Chocó - Río Atrato

Listado de figuras

Figura 1. Pasos para el proceso de construcción e implementación del Promsea	40
Figura 2. Principios para la construcción del Promsea	43
Figura 3. Fases planteadas para el proceso de construcción del Protocolo	44
Figura 4. Actores del Sistema Nacional Ambiental (Sina)	47
Figura 5. Línea de tiempo de hitos ambientales globales.....	62
Figura 6. ODS en los que se enmarca la protección de humedales	64
Figura 7. Compromisos nacionales e internacionales cuyos procesos aportan al monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos del país	65
Figura 8. Recorrido normativo: el agua como recurso, su monitoreo, conservación, uso y aprovechamiento de los ecosistemas acuáticos en el país.....	66
Figura 9. Líneas estratégicas de la PNMEC	69
Figura 10. Contexto normativo e instrumentos de gestión de los humedales en Colombia.....	70
Figura 11. Áreas hidrográficas y proyectos licenciados	101
Figura 12. Mapas nacionales de vulnerabilidad y riesgo al cambio climático	108
Figura 13. Principales presiones identificadas en las áreas hidrográficas del país.....	109
Figura 14. Proceso jerárquico para la estructuración de la matriz de variables mínimas, intermedias y complementarias de relevancia para el monitoreo integral de los ecosistemas acuáticos	115
Figura 15. Fases metodológicas de la evaluación multicriterio mediante el PAJ.....	133
Figura 16. Modelo jerárquico diseñado para la zonificación de ecosistemas acuáticos.....	134

Figura 17.	
Modelo jerárquico diseñado para la zonificación de ecosistemas acuáticos.....	142
Figura 18.	
Diagrama metodológico para el procesamiento digital de imágenes de sensores remotos multiespectrales.....	154
Figura 19.	
Ejemplo de proceso de segmentación para imágenes de radar.....	159
Figura 20.	
Ejemplo de toma de puntos para la evaluación de la exactitud.....	160
Figura 21.	
Hoja de ruta de la propuesta metodológica del Promsea en Colombia.....	164
Figura 22.	
Propuesta de monitoreo por fenómeno de transformación de carga contaminante para establecer el estado de los ecosistemas acuáticos a escala nacional.....	168
Figura 23.	
Estadísticas, índices e indicadores de monitoreo de la calidad del agua a nivel nacional.....	169
Figura 24.	
Focos de contaminación emergente hacia los ecosistemas acuáticos.....	173
Figura 25.	
Tipos de floraciones y su distribución en la columna de agua.....	174
Figura 26.	
Ruta metodológica propuesta para el monitoreo de las floraciones algales y los factores que las indiquen en campo y a partir de imágenes satelitales para ecosistemas acuáticos continentales, marinos y costeros.....	176
Figura 27.	
Propuesta de monitoreo por fenómeno de transformación de fragmentación para establecer el estado de los ecosistemas acuáticos a escala nacional.....	191
Figura 28.	
Ejemplo del cálculo del índice de fragmentación, a partir del mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia (Escala 1:100.000).....	193
Figura 29.	
Ejemplo de proceso de fragmentación en ecosistemas de arbustales inundables.....	194
Figura 30.	
Ejemplo para calcular el FCI.....	195
Figura 31.	
Ejemplo del cálculo del PD.....	196

Figura 32.	
Modelación hidráulica en HEC-GeoRAS para analizar la dinámica de cauce.....	197
Figura 33.	
Ejemplo de análisis de secciones transversales del ecosistema de río con el modelo HEC-RAS.....	198
Figura 34.	
Interfaz del software <i>MaxEnt</i>	199
Figura 35.	
Ejemplo de modelo de distribución de especies generado en el software MaxEnt	200
Figura 36.	
Ejemplo del cálculo de la superficie ocupada por la infraestructura.....	201
Figura 37.	
Principales procesos y compartimentos implicados en el ciclo del carbono, en ecosistemas acuáticos epicontinentales.....	205
Figura 38.	
Variables clave para el análisis de emisiones de GEI en ecosistemas acuáticos.....	206
Figura 39.	
Ecuaciones empleadas para la categoría de Humedales (3B4a).....	209
Figura 40.	
Principales compartimentos y flujos de Carbono Azul en los ecosistemas marino - costeros.....	212
Figura 41.	
Estructura de Adaptación.....	216
Figura 42.	
Sistemas de información ambiental operables con el Promsea	228
Figura 43.	
Ejemplo del proceso de interoperabilidad entre los sistemas de información ambiental del país	238
Figura 44.	
Propuesta metodológica del Promsea	245
Figura 45.	
Pasos mínimos para la implementación y validación del Promsea, en ventanas piloto.....	246
Figura 46.	
Mapa zonificación hidrográfica del país (áreas hidrográficas).....	248
Figura 47.	
Capas generadas a partir de la extracción de ecosistemas acuáticos por área hidrográfica	249
Figura 48.	
Humedales Ramsar de Colombia	255
Figura 49.	
Mapa cuencas priorizadas para ordenamiento	257

Figura 50.	Esquema metodológico para la categorización de subzonas hidrográficas, por evaluación integrada del agua	259
Figura 51.	Mapa Categorización de Subzonas Hidrográficas, según evaluación integrada del agua	260
Figura 52.	Mapa de Análisis Municipal de Riesgo por Cambio Climático - TCNCC	262
Figura 53.	Mapa de Componente Étnico.....	264
Figura 54.	Modelo para la construcción de la matriz de comparación de criterios, según la escala de valoración del PAJ	265
Figura 55.	Diagrama resumen de la metodología de análisis para la clasificación socioeconómica de las SZH y UAC.....	274
Figura 56.	Ejemplo de los posibles resultados del desarrollo de los pasos 1, 2 y 3 de la hoja de ruta para la implementación y validación del Promsea, en ventanas piloto.....	275
Figura 57.	Clasificación de los métodos de imputación.....	281
Figura 58.	Técnicas de imputación	282
Figura 59.	Identificación preliminar de ventanas piloto para la implementación del Promsea	295
Figura 60.	Regiones costeras, insulares y marinas de Colombia.....	300
Figura 61.	Esquema general, según la escala de monitoreo, para el componente de geomorfología y suelos.....	302
Figura 62.	Propuesta para zonificación de UM, a partir del componente de geomorfología y suelos.....	303
Figura 63.	Esquema para homologación de suelos de Sistema USDA a IPCCm.....	305
Figura 64.	Proceso general de diseño de los indicadores, a partir de las comunidades hidrobiológicas.....	308
Figura 65.	Proceso de diseño de los índices de integridad biótica	312
Figura 66.	Proceso metodológico general para el análisis de los atributos seleccionados y los parámetros fisicoquímicos para la construcción de IIB	313

Listado de tablas

Tabla 1. Resultados de la articulación con diversos actores nacionales, en el marco de la formulación del Promsea (2019 – 2021).....	48
Tabla 2. Trabajo realizado por las entidades participantes en el Promsea	49
Tabla 3. Tipología de ambientes acuáticos de la Amazonía colombiana.....	76
Tabla 4. Entidades regionales que participan en los procesos de monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos en el país	78
Tabla 5. Actores privados y ONG que participan en los procesos de monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos en el país	85
Tabla 6. Entidades educativas que participan en procesos de monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos en Colombia	89
Tabla 7. Presiones de transformación por tipo de ecosistema acuático identificados en el marco del proceso de construcción del Promsea	93
Tabla 8. Porcentaje de demanda hídrica sectorial por área hidrográfica	94
Tabla 9. Estadística de disposición final de residuos sólidos en Colombia (en toneladas)	95
Tabla 10. Porcentajes de remoción de carga contaminante a nivel nacional, en sectores industrial y doméstico (2016).....	97
Tabla 11. Actividades de minería de carbón por área hidrográfica.....	98
Tabla 12. Áreas hidrográficas con EVOA en tierra.....	99
Tabla 13. Deforestación anual en las diferentes áreas hidrográficas del país (año / ha).....	100
Tabla 14. Departamentos que se destacan por el área destinada a la agricultura en las áreas hidrográficas del Magdalena-Cauca, Pacífico y Orinoco. (Área sembrada expresada en hectáreas)	102

Tabla 15.	
Área destinada para la siembra de principales cultivos permanentes y transitorios en los departamentos de Antioquia, Meta, Tolima, Valle del Cauca, Santander y Huila.....	102
Tabla 16.	
Número de animales (bovinos, aves y otros), según regiones colombianas.....	103
Tabla 17.	
Número de arribos de buques por zona portuaria	104
Tabla 18.	
Porcentaje de participación anual de las zonas portuarias en el tráfico portuario nacional.....	104
Tabla 19.	
Presiones identificadas sobre el recurso pesquero y especies continentales en amenaza por captura de juveniles.....	105
Tabla 20.	
Riqueza y número de especies continentales endémicas, amenazadas, comerciales y registradas en las áreas protegidas nacionales, en cada área hidrográfica del país.....	106
Tabla 21.	
Porcentaje de presiones sobre el recurso pesquero marino para las dos zonas costeras del país	107
Tabla 22.	
Variables y/o atributos físicos identificados para el monitoreo integral de los ecosistemas acuáticos del país	117
Tabla 23.	
Variables y/o atributos químicos identificados para el monitoreo integral de los ecosistemas acuáticos del país.....	122
Tabla 24.	
Variables y/o atributos biológicos identificados para el monitoreo integral de los ecosistemas acuáticos del país.....	128
Tabla 25.	
Variables definidas como criterios para la zonificación de los ecosistemas acuáticos.....	135
Tabla 26.	
Variables incluidas en la primera propuesta de zonificación de ecosistemas acuáticos.....	136

Tabla 27.	
Categorías de escalas y nivel de detalle cartográfico	138
Tabla 28.	
Ejemplos de geoformas de ecosistemas acuáticos, según nivel de detalle	138
Tabla 29.	
Relaciones entre el Tipo de suelo IPCC y los fenómenos de transformación	139
Tabla 30.	
Pendientes establecidas en Colombia.....	141
Tabla 31.	
Escala de valoración PAJ	143
Tabla 32.	
Matriz de comparaciones de criterios, según la escala de valoración del PAJ	144
Tabla 33.	
Escalas cartográficas y niveles de levantamiento de información geográfica.....	147
Tabla 34.	
Imágenes satelitales ópticas propuestas para la implementación del Promsea.....	148
Tabla 35.	
Imágenes de satélite ópticas adecuadas para las diferentes escalas cartográficas.....	149
Tabla 36.	
Imágenes satelitales de radar propuestas para la implementación del Promsea	150
Tabla 37.	
Imágenes de satélite de radar adecuadas para las diferentes escalas cartográficas.....	151
Tabla 38.	
Clases de cámaras para la toma de fotografías aéreas.....	152
Tabla 39.	
Índices espectrales propuestos para el monitoreo de ecosistemas acuáticos	155
Tabla 40.	
Ejemplo de una matriz de confusión para clasificación supervisada	161
Tabla 41.	
Contaminantes emergentes propuestos	171
Tabla 42.	
Relación entre los niveles de alerta, vigilancia y densidad de cianobacterias totales para agua destinada al consumo y contacto primario humano recomendados por la OMS	177
Tabla 43.	
Metodología de monitoreo para el levantamiento de plantas acuáticas y semiacuáticas	179
Tabla 44.	
Indicadores e índices para el análisis de comunidades hidrobiológicas propuestos para la implementación del Promsea.....	180

Tabla 45.	
Clasificación del grado de salinización propuesto.....	187
Tabla 46.	
Posibles impactos (directos e indirectos) e indicadores de los efectos del cambio climático sobre los ambientes acuáticos lénticos	218
Tabla 47.	
Posibles impactos (directos e indirectos) e indicadores de los efectos del cambio climático sobre los ambientes acuáticos lóticos	221
Tabla 48.	
Posibles impactos (directos e indirectos) e indicadores de los efectos del cambio climático sobre los ambientes acuáticos transicionales (humedales)	224
Tabla 49.	
Sistemas de información o bases de datos que albergan las variables prioritizadas por fenómeno de transformación para el monitoreo y seguimiento del estado de los ecosistemas acuáticos del país	230
Tabla 50.	
Relación de insumos existentes y requeridos en geomorfología y suelos	240
Tabla 51.	
Áreas calculadas por área hidrográfica para los ecosistemas acuáticos.....	250
Tabla 52.	
Ecosistemas acuáticos síntesis prioritizados para cada área hidrográfica.....	251
Tabla 53.	
Humedales declarados como sitios Ramsar de Colombia	253
Tabla 54.	
Número de programas, según las fases de desarrollo de los planes de ordenamiento y manejo de cuencas prioritizadas, por área hidrográfica del país.....	258
Tabla 55.	
Categorías de clasificación de las SZH y UAC, de acuerdo con la presencia y tendencias de las actividades socioeconómicas.....	273
Tabla 56.	
Unidades estadísticas del Promsea	289
Tabla 57.	
Áreas o ecosistemas prioritizados como ventadas piloto de implementación	293
Tabla 58.	
Unidades Ambientales Costeras y Oceánicas de Colombia.....	301
Tabla 59.	
Características o atributos para zonificación y caracterización LB	304
Tabla 60.	
Protocolos y guías (adoptados y en proceso de adaptación) para el sistema de monitoreo de los ecosistemas acuáticos del país.....	316

Índice de siglas / Acrónimos

A

ACP	Análisis de Componentes Principales	Carder	Corporación Autónoma Regional de Risaralda
AFOLU	Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra / <i>Agriculture, Forestry and Other Land Uses</i> (por su sigla en inglés)	Cardique	Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique
Aicca	Adaptación a los Impactos del Cambio Climático en los recursos hídricos de los Andes	Carsucre	Corporación Autónoma Regional de Sucre
Agenda 21	Plan de Acción Programa 21	CAS	Corporación Autónoma Regional de Santander
Agro-savia	Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (antes Corpoica)	CC	Capacidad de Campo
Anla	Autoridad Nacional de Licencias Ambientales	CCO	Comisión Colombiana del Océano
ANM	Agencia Nacional de Minería		Corporación para el Desarrollo Sostenible del Norte y Oriente Amazónico
ANT	Agencia Nacional de Tierras	CDA	
ATTZ	Zonas de Transición Acuático-Terrestres	CDCOL	Cubo de Datos de Colombia
Aunap	Autoridad Nacional de Pesca y Acuicultura	CDMB	Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga

B

BID	Banco Interamericano de Desarrollo
BT	Bases Totales
BUR	Informe Bienal de Actualización / <i>Biennial Update Report</i> (por su sigla en inglés)

C

C	Carbono
CAM	Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena
CAR	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca

CE	Conductividad Eléctrica
CEN	<i>Comité Européen de Normalisation</i>
Ceniacua	Centro de Investigación de la Acuicultura de Colombia
Cenicafé	Centro Nacional de Investigaciones del Café
CGIAR	Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional / <i>Consultative Group on International Agricultural Research</i> (por su sigla en inglés)
CGSM	Ciénaga Grande de Santa Marta
CH₄	Gas metano
Chl	Concentración de clorofila a
Ciat	Centro Internacional de Agricultura Tropical
CIC	Capacidad de Intercambio Catiónico

	Instituto de Investigación y Desarrollo en Abastecimiento de Agua, Saneamiento Ambiental y Conservación del Recurso Hídrico de la Universidad del Valle	Cinara		Corpamag	Corporación Autónoma Regional del Magdalena
	Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria	Cipav		Corpoamazonia	Corporación para el Desarrollo Sostenible del Sur de la Amazonía Colombiana
	Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe	CIOH		Corpoboyacá	Corporación Autónoma Regional de Boyacá
	<i>Corine Land Cover</i>	CLC		Corpocaldas	Corporación Autónoma Regional de Caldas
	Carnívoros Macrófagos (consumidores de otros peces)	CM		Corpocesar	Corporación Autónoma Regional del Cesar
CMNUCC	Comisión Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático			Corpochivor	Corporación Autónoma Regional de Chivor
CNPV	Censo Nacional de Población y Vivienda			Corpoguajira	Corporación Autónoma Regional de La Guajira
CNULD	Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación			Corpoguavio	Corporación Autónoma Regional del Guavio
CO₂	Dióxido de Carbono			Corpoica	Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (ahora Agrosavia)
COD	Carbono Orgánico Disuelto			Corpomojana	Corporación para el Desarrollo Sostenible de La Mojana y el San Jorge
Codechocó	Corporación Autónoma Regional para el Desarrollo Sostenible del Chocó			Corponariño	Corporación Autónoma Regional de Nariño
Condesan	Consortio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina			Corponor	Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental
COP	Compuestos Orgánicos Persistentes			Corporinoquia	Corporación Autónoma Regional de la Orinoquia
Corantioquia	Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia			Corpourabá	Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá
Coralina	Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina			Cortolima	Corporación Autónoma Regional del Tolima
Cormacarena	Corporación para el Desarrollo Sostenible del Área de Manejo Especial La Macarena			COS	Carbono Orgánico en Suelos
Cormagdalena	Corporación Autónoma Regional del Río Grande de La Magdalena			CR	Relación de Consistencia
Cornare	Corporación Autónoma Regional de las cuencas de los ríos Negro y Nare			CRA	Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico
				CRC	Corporación Regional del Cauca

CRQ	Corporación Autónoma Regional del Quindío
CSB	Corporación Autónoma Regional del Sur de Bolívar
CV	Coefficiente de Variación
CVC	Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca
CVS	Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge

D

DA	Diatomeas Acidobiónticas
Dagma	Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente
DAk	Diatomeas Alcalifíticas
Damab	Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente Barranquilla
Dane	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DBO	Demanda Biológica de Oxígeno
DBO5	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DE	Diatomeas Eutróficas
DEM	Modelo de elevación digital / <i>Digital Elevation Model</i> (por su sigla en inglés)
DHIME	Sistema de información para la gestión de datos hidrológicos y meteorológicos
Dimar	Dirección General Marítima de Colombia
DLR	Centro Espacial Alemán
DM	Diatomeas Móviles
DO	Diatomeas Exigentes en Oxígeno
DP	Diatomeas Polisapróbicas
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DS	Diatomeas Sensibles
DT	Diatomeas Tolerantes

E

EA	Especies Anuales
-----------	------------------

EE	Especies Exóticas
EIR	Espectroscopía de Infrarrojo
EM	<i>Expectation-Maximization</i>
EMC	Evaluación Multicriterio
ENA	Estudio Nacional del Agua
ENO	El Niño-Oscilación del Sur
EP	Especies Riparias
EPA	Establecimiento Público Ambiental
EPM	Empresas Públicas de Medellín
EPSA	Empresa de Energía del Pacífico S.A. E.S.P
EQ	Especies Acuáticas
ES	Especies Sensibles al Disturbio
ESA	Agencia Espacial Europea
EPT	Índice Ephemeroptera, Plecóptera y Trichoptera
ER	Especies Ruderales
ET	Especies Tolerantes a la Perturbación
ETCCA	Espacio Técnico Científico de Carbono Azul
EVA	Evaluaciones Agropecuarias Municipales
EVOA	Evidencia de Explotación de Oro de Aluvión

F

FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura / <i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i> (por su sigla en inglés)
FCI	Índice de Continuidad Espacial de Vogelmann
FNC	Federación Nacional de Cafeteros de Colombia

G

GBIF	Sistema Global de Información sobre Biodiversidad / <i>Global Biodiversity Information Facility</i> (por su sigla en inglés)	Icomo	Índice de Contaminación por Materia Orgánica
GCI	Índice de Clorofila	Icontec	Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación
GC-MS	Cromatografía de Gases acoplada a Espectrometría de Masas	Icosus	Índice de Contaminación por Sólidos Suspendedos
GEI	Gases de Efecto Invernadero	Icotro	Índice de Contaminación Trófica
GEF	Fondo para el Medio Ambiente Mundial/ <i>Global Environment Facility</i> (por su sigla en inglés)	ICTac	Indicador de Condición Tendencia de áreas coralinas
GESAMP	Grupo de Expertos sobre los Aspectos Científicos de la Protección del Medio Marino / <i>Group of Expert on the Scientific Aspects on Marine Environmental Protection</i> (por su sigla en inglés)	ICTbm	Indicador de Condición Tendencia de bosques de manglar
GSP	Alianza Mundial por los Suelos	ICTpm	Indicador de Condición Tendencia de pastos marinos
	H	Ideam	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
HAC	Arcillas de Alta Actividad / <i>High Activity Clay</i> (por su sigla en inglés)	IES	Instituciones de Educación Superior
HEC-RAS	Sistema de análisis de ríos del Centro de Ingeniería Hidrológica / <i>Hydrologic Engineering Center's River Analysis System</i> (por su sigla en inglés)	Igac	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
HPLC	Cromatografía Líquida de Alta Resolución / <i>High-Performance Liquid Chromatography</i> (por su sigla en inglés)	IH	Índice de Hilsenhoff
HQ	Coefficiente de Peligrosidad / <i>Hazard Quotient</i> (por su sigla en inglés)	IIAP	Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico
	I	IIB	Índices de Integridad Biótica
IACAL	Índice de Alteración potencial de la Calidad del Agua	IIB Comp	Índice de Integridad Biótica Compuesto
IARC	Índice de Agua no Retornada a la Cuenca	IIB Macro	Índice de Integridad Biótica para Macroinvertebrados
IC	Índice de Consistencia	IIB Pec	Índice de Integridad Biótica Peces
ICA	Índice de Consistencia Aleatorio	IIB peri	Índice de Integridad Biótica perifiton
ICA	Instituto Colombiano Agropecuario	IIB VegR	Índice de Integridad Biótica Vegetación de Ribera
ICO	Índices de Contaminación	IIH	Índice de Integridad de Hábitat
Icomi	Índice de Contaminación por Mineralización	IM	Individuos Migratorios
		Inciva	Instituto para la Investigación y la Preservación del Patrimonio Cultural y Natural del Valle del Cauca
		Ingei	Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero
		Instituto Humboldt	Instituto de Investigación en Recursos Biológicos
		Invemar	Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés

IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático / <i>United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (por su sigla en inglés)	MNDWI	Índice de Diferencia de Agua Normalizado Modificado / <i>Modified Normalized Difference Water Index</i> (por su sigla en inglés)
IPCCm	IPCC modificado	MODIS	Espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada/ <i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i> (por su sigla en inglés)
IPHE	Índice de Presión Hídrica sobre los Ecosistemas	MOM	Materia Orgánica Muerta
IRH	Índice de Regulación Hídrica	MCP	Monitoreo Comunitario Participativo
ISO	International Standardization Organisation		
ITPm	Índice Trófico Planctónico		
IUA	Índice de Uso del Agua		
IVH	Índice de Vulnerabilidad Hídrica al Desabastecimiento		
	K		
K	Potasio	Nal	Sodio Intercambiable
Kari	Instituto de Investigación Aeroespacial de Corea	NARP	Comunidades Negras, Afrodescendientes, Raizales y Palenqueras
	L	Nasa	Administración Nacional de Aeronáutica del Espacio / <i>National Aeronautics and Space Administration</i> (por su sigla en inglés)
LAC	Arcillas de Baja Actividad / <i>Low Activity Clay</i> (por su sigla en inglés)	NDC	Contribuciones Nacionalmente Determinadas / <i>Nationally Determined Contributions</i> (NDC por su sigla en inglés)
	M	NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado
MADR	Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural	NDWI	Índice de Diferencia de Agua Normalizado / <i>Normalized Difference Water Index</i> (por su sigla en inglés)
MCAR	Datos faltantes completamente aleatorios / <i>Missing Completely at Random</i>	NICFI	Iniciativa Internacional sobre Clima y Bosques de Noruega
MCP	Monitoreo Comunitario Participativo	NT	Nitrógeno Total
MDE	Modelo Digital de Elevación		
MEC	Mapa de Ecosistemas Continentales, Costeros y Marinos de Colombia		
Mimea	Mesa Interinstitucional de Monitoreo de Ecosistemas Acuáticos		
MinAmbiente	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible		
MME	Ministerio de Minas y Energía		
			O
		Ocde	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
		ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
		OGC	<i>Open Geospatial Consortium</i>
		Onic	Organización Nacional Indígena de Colombia
		ONGs	Organizaciones No Gubernamentales
		Osso	Corporación Observatorio Sismológico del Sur Occidente

P

P	Fósforo
PA	Porcentaje de Especies Amenazadas
PAJ	Proceso Analítico Jerárquico
PAN	Plan de Acción Nacional de Lucha contra la Desertificación y la Sequía
PCN	Proceso Comunidades Negras
PD	Índice de Densidad
PH	Potencial de Hidrógeno
PMP	Punto de Marchitez Permanente
PPN	Producción Primaria Neta
PPNA	Productividad Primaria Neta Aérea
PN	Especies Nativas
Pn	Perímetro Normalizado
PNAOCI	Política Nacional Ambiental para el desarrollo sostenible de los espacios Oceánicos y las zonas Costeras e Insulares de Colombia
PNN	Parques Nacionales Naturales de Colombia
PNGIBSE	Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos
PNGIRH	Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico
PNMEC	Programa Nacional de Monitoreo de Ecosistemas
PNMHC	Programa Nacional de Monitoreo de Humedales
PNMRH	Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico
PNSA	Sociedad Portuaria Puerto Nuevo S. A.
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
POMCA	Plan de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas
Pomiuac	Planes de Ordenación y Manejo Integrado de la Unidad Ambiental Costera
PPS/RS	Producción Potencial de Sedimentos

PRO Puntos de Referencia Objetivo

PRL Puntos de Referencia Limite

Promsea Protocolo de Monitoreo y Seguimiento del Estado de los Ecosistemas Acuáticos

PTAR Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales

PT Fósforo Total

PVC Policloruro de vinilo

R

Recompas Corporación Red de Consejos Comunitarios del Pacífico Sur

Redcam Programa Nacional de Monitoreo

RQI Índice de Calidad Ambiental de las Riberas / *Riverbank Environmental Quality Index* (por su sigla en inglés)

RT Porcentaje de Reducción de Tallas

RUA Registro Único Ambiental

RURH Registro de Usuarios de del Recurso Hídrico

S

SAMP Sistema de Áreas Marinas Protegidas

Sat. Al Saturación de aluminio

SAVI Índice de Vegetación Ajustado al Suelo

SB Saturación de Bases

SDA Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá

SEIA Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental

SEN Sistema Estadístico Nacional

Sena Servicio Nacional de Aprendizaje

Sepec Servicio Estadístico Pesquero colombiano

Siac Sistema de Información Ambiental de Colombia

Siam Sistema de Información Ambiental Marina

SIAT AC	Sistema de Información Ambiental Territorial de la Amazonía colombiana		
SIAT PC	Sistema de Información Ambiental Territorial del Pacífico colombiano		
SiB	Sistema de Información sobre Biodiversidad		
SIG	Sistema de Información Geográfica		
SIG-OT-IGAC	Sistema de Información Geográfica para el Ordenamiento Territorial del Igac		
Simcoba	Sistema de Monitoreo de las Coberturas de la tierra de la Amazonía colombiana		
Simses	Sistema de procesos asociados a la desertificación y sequía		
SINA	Sistema Nacional Ambiental		
Sinap	Sistema Nacional de Áreas Protegidas		
Sinchi	Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas		
SIPGA	Sistema de Información para la Planeación y la Gestión Ambiental		
SIPGA-CAR	Sistema de Información para la Planeación y la Gestión para las corporaciones autónomas regionales		
SIRH	Sistema de Información del Recurso Hídrico		
SMBYC	Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono		
SNIF	Sistema Nacional de Información Forestal		
SNUIRA	Sistema Nacional Unificado de Información Rural Agropecuaria		
SSD SAMP	Sistema de Soporte a las Decisiones para el Subsistema de Áreas Marinas protegidas		
SST	Sólidos Suspendidos Totales		
Superservicios	Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios		
SZH	Subzona Hidrográfica		
		T	
		TCNCC	Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático
		TNC	The Nature Conservancy
		TSI	Índice de Estado Trófico / <i>Trophic State Index</i> (por su sigla en inglés)
		U	
		UAC	Unidades Ambientales Costeras
		Uaco	Unidades Ambientales y Costeras Oceánicas
		UAS	Sistemas de Aeronaves no Tripuladas / <i>Unmanned Aircraft Systems</i> (por su sigla en inglés)
		UCS	Unidades Cartográficas de Suelo
		UDCA	Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales
		UM	Unidades de Monitoreo
		UMATA	Unidad Municipal de Asistencia Técnica Agropecuaria
		UNCCD	Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación / <i>United Nations Convention to Combat Desertification</i> (por su sigla en inglés)
		UNODC	Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito
		UPME	Unidad de Planeación Minero Energético
		Upra	Unidad de Planificación Rural Agropecuaria
		USDA	Departamento de Agricultura de Estados Unidos / <i>United States Department of Agriculture</i> (por su sigla en inglés)
		Usaid	Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional
		USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos / <i>United States Geological Survey</i> (por su sigla en inglés)

V

- VOH** Variabilidad de la Oferta Hídrica
- VRH** Vulnerabilidad del Recurso Hídrico

W

- WCS** Sociedad para la Conservación de la Vida Silvestre / *Wildlife Conservation Society* (por su sigla en inglés)
- WOCAT** Panorama mundial de los enfoques y tecnologías de conservación / *World Overview of Conservation Approaches and Technologies* (por su sigla en inglés)
- WWF** Fondo Mundial para la Naturaleza / *World Wide Fundation* (por su sigla en inglés)

Z

- ZRC** Zonas de Reserva Campesina





Caño Correa. Canal del Dique María la Baja - Bolívar



Introducción

La degradación de los ecosistemas acuáticos constituye una problemática crítica en el ámbito global. Estudios recientes han evidenciado que los ecosistemas de agua dulce enfrentan una crisis sin precedentes, con la pérdida del 87 % de los humedales del planeta en los últimos 300 años, de los cuales más del 50 % han desaparecido desde 1900. Esto representa un ritmo de desaparición tres veces más rápido que el de los bosques (Gardner *et al.*, 2018).

En Colombia, aunque las tasas y patrones de pérdida y degradación de los ecosistemas acuáticos son menos conocidas, se ha identificado una pérdida significativa en los últimos 50 años. Las principales causas incluyen la sobreexplotación pesquera y minera, el uso de artes de pesca ilegales y el desarrollo de infraestructura sin evaluaciones ambientales adecuadas. En el caso de los ecosistemas acuáticos continentales, entre los principales motores de cambio se incluyen: su drenaje, conversión a causa de los efectos de actividades realizadas en zonas de ronda hídrica (presión por demanda de la tierra y políticas de desarrollo económico), la sedimentación relacionada con procesos de degradación y erosión del suelo en la cuenca, la expansión agrícola y ganadera y la contaminación química y orgánica, derivadas principalmente de aguas residuales industriales y domésticas (Naranjo *et al.*, 1999). Estas dinámicas han impactado negativamente los ecosistemas acuáticos y los servicios ecosistémicos que generan, afectando la biodiversidad, el suministro de agua, las actividades culturales y recreativas, y han aumentado las amenazas naturales como inundaciones y sequías (WWF-Colombia, 2017; Naranjo *et al.*, 1999).

De esta forma, la pérdida y degradación de los ecosistemas ha resultado en el menoscabo de los servicios de soporte, regulación, aprovisionamiento y culturales. Estos se relacionan con una serie de dinámicas de orden ambiental, económico y social, como el aumento de amenazas naturales (eventos extremos de inundación y sequía), la disminución del valor de la tierra, el incremento en la inversión de presupuesto para el tratamiento de

aguas residuales (pérdida de la capacidad de depuración natural del ecosistema), la disminución de las fuentes de alimentación e insumos naturales provenientes del ecosistema acuático (biodiversidad acuática) y el detrimento de actividades culturales y de recreación, relacionadas con los cuerpos de agua (recreación, espacios sagrados) (Chicharo, Müller y Fohrer, 2015).

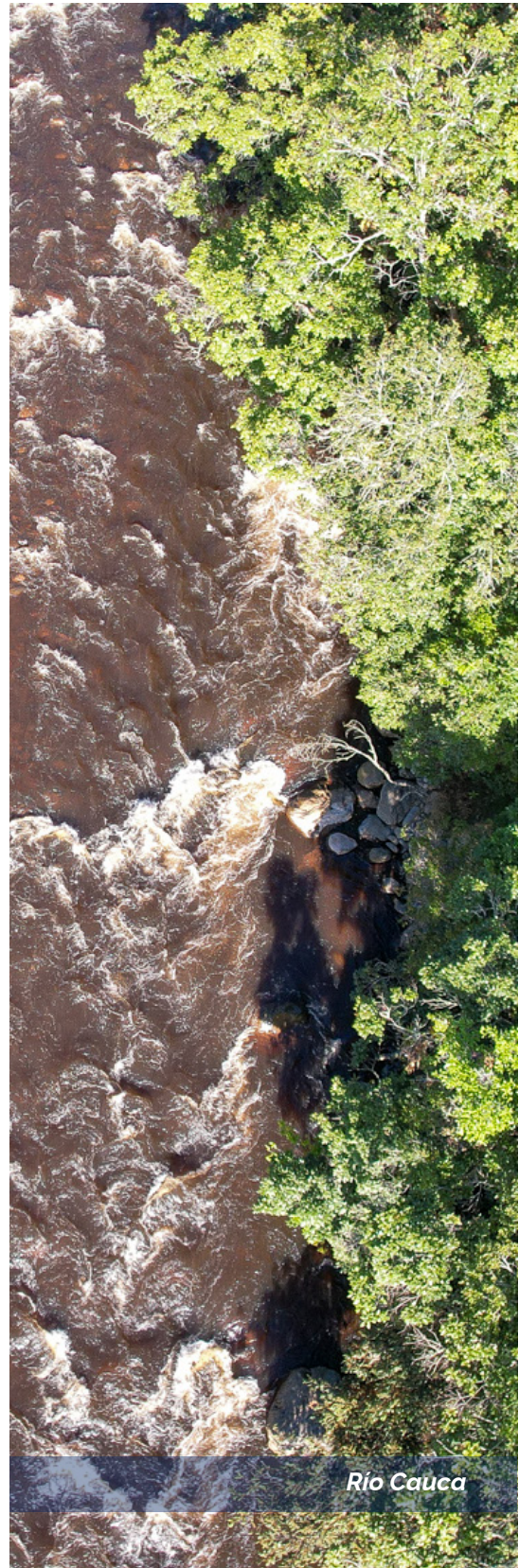
En este contexto, se ha identificado la necesidad de evaluar integralmente los ecosistemas acuáticos, con un enfoque que trascienda la calidad y cantidad del recurso hídrico, e integre aspectos funcionales y estructurales que reflejen su estado general. Para responder a esta necesidad, el Protocolo de Monitoreo y Seguimiento del Estado de los Ecosistemas Acuáticos (Promsea) tiene como objetivo principal el desarrollo de una herramienta técnica, conceptual y metodológica para monitorear y orientar directrices para la gestión sostenible de los ecosistemas acuáticos del país. Esto específicamente, para tres fenómenos prioritarios: carga contaminante, fragmentación y cambio climático.

El desarrollo del Promsea fue liderado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) a través de la Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental (SEIA). Este esfuerzo contó con la colaboración de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente) como máxima autoridad ambiental, así como de otras entidades del Sistema Nacional Ambiental (Sina). Adicionalmente, el protocolo integró aprendizajes de proyectos relevantes como el proyecto de estimación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y flujo de carbono en humedales de alta montaña de la Subdirección de Estudios Ambientales con apoyo de Chemonics, el proyecto GEF Magdalena-Cauca VIVE de la Fundación Natura, y el proyecto de Adaptación a los Impactos del Cambio Climático en los recursos hídricos de los Andes (Aicca) ejecutado por el Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (Condesan), que se implementan en Colombia en conjunto con el Ideam y MinAmbiente.

Teniendo en cuenta el marco normativo nacional, esta iniciativa del Ideam se generó bajo la sombrilla que agrupa las políticas y programas que enmarcan actualmente el estudio de los ecosistemas acuáticos del país, tales como la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PN-GIRH), Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos (PNGIBSE) y el Programa Nacional de Monitoreo de Humedales de Colombia (PNMHC; MinAmbiente 2022). Ello se enmarca en la propuesta de MinAmbiente (2022) en términos de:

Adelantar estrategias con el fin de dar respuesta a la problemática sobre la ausencia de directrices que determinen lineamientos articulados para orientar el monitoreo continuo y sistemático de ecosistemas y sus componentes a nivel nacional, regional y local, en el largo plazo, para mejorar la obtención de información y conocimiento que contribuya en la toma de decisiones de gestión para el manejo integral y la conservación de los ecosistemas de Colombia.

El Promsea representa un esfuerzo interinstitucional e interdisciplinar que busca consolidarse como la herramienta de referencia para el monitoreo de los ecosistemas acuáticos del país. Orienta las directrices respecto a su gestión, particularmente frente a tres fenómenos de transformación priorizados: carga contaminante, fragmentación y cambio climático. Este enfoque responde a las dinámicas de transformación de los ecosistemas, generando insumos para su gestión integral y conservación a nivel nacional. Para lograr este objetivo, se siguieron una serie de pasos que buscan garantizar la implementación efectiva de la herramienta, tal como se ilustra en la Figura 1.



Río Cauca

Figura 1. Pasos para el proceso de construcción e implementación del Promsea



La Figura 1 muestra un ciclo de seis etapas. Comienza con la definición de criterios y conceptos unificados, que sirven como base para establecer un diálogo y articulación institucional efectivos. A partir de este diálogo, se valida la calidad de la información, asegurando que sea viable, sostenible y trascendente en su ob-

tención y análisis. Esta información permite la implementación de un sistema dinámico, con monitoreo permanente y análisis periódico, lo cual resulta crucial para la generación de alertas tempranas que informan la toma de decisiones.

Objetivos por componente de desarrollo

El Promsea tiene como objetivo abordar los ecosistemas acuáticos a partir de un enfoque interdisciplinar, proporcionando las herramientas necesarias para la construcción de un modelo integrador que permita el monitoreo y seguimiento de su estado a nivel nacional. Para ello, el proto-

colo plantea objetivos específicos para cada uno de los componentes que integran este modelo, los cuales podrán ajustarse de acuerdo con la dinámica propia de los ecosistemas y las necesidades de gestión que surjan en el país.

■ Componente hidrológico

- Generar un modelo para la integración de criterios, variables, índices e indicadores necesarios para el monitoreo de la calidad y cantidad del recurso hídrico del país.

■ Componente hidrobiológico

- Generar el marco técnico conceptual y operativo para la identificación de las variables, índices e indicadores mínimos que desde el componente hidrobiológico permitan conocer y evaluar el estado de los ecosistemas acuáticos del país.

■ Componente físico

- Generar un modelo operativo de integración de variables espaciales asociadas a indicadores de monitoreo de los ecosistemas acuáticos del país.

- Diseñar una metodología de zonificación temática como insumo base para la construcción del Promsea.

- Generar el marco técnico conceptual y operativo para la identificación de las variables, índices e indicadores mínimos que desde el componente físico permitan conocer y evaluar el estado de los ecosistemas acuáticos del país.

■ Componente socioeconómico

- Identificar las principales presiones y tendencias de cambio sobre los ecosistemas acuáticos, en relación con actividades socioeconómicas desarrolladas en el país, para su inclusión en el marco de la propuesta metodológica del Promsea.

- Definir lineamientos mínimos para viabilizar procesos de monitoreo comunitario participativo en las ventanas piloto de implementación del Promsea.

Alcance

El alcance del Promsea se basa en el concepto de monitoreo, entendido como un acercamiento para evaluar la integridad ecológica de los ecosistemas acuáticos. En este contexto, es una herramienta dinámica que proporciona lineamientos conceptuales y metodológicos para el monitoreo integral de los ecosistemas acuáticos del país. Su construcción se fundamenta en la realidad socio-ecosistémica del territorio nacional y responde a la escala de trabajo misional del Ideam, tomando como referencia la zonificación hidrográfica definida por las cinco áreas principales del país: Caribe, Magdalena-Cauca, Orinoco, Amazonas y Pacífico (Ideam, 2013a).

Con esta herramienta, el Ideam realiza su primer acercamiento integral al monitoreo ecosistémico, abordando el agua no solo como el recurso principal que regula las interacciones en un ecosistema acuático en términos de calidad y cantidad, sino que integra múltiples dimensiones:

- El agua como soporte para la biota y las comunidades vegetales ribereñas, que modelan el cauce y participan en el ciclo hidrológico aportando beneficios.
- La interacción del agua con la geomorfología y los suelos, que definen sus características físicas y químicas.

- El vínculo con las poblaciones humanas, para quienes el agua es un insumo esencial para la subsistencia y actividades productivas.
- Las actividades sectoriales que generan presiones crecientes, lo que resalta la necesidad de identificar estos ecosistemas como ambientes estratégicos de conservación a nivel nacional.

Evaluar, conservar y promover el uso sostenible de los ecosistemas acuáticos implica, en primer lugar, reconocer su estado actual, identificar las presiones que alteran su estructura natural, analizar las tendencias de cambio e implementar medidas efectivas de conservación. Por esta razón, el Promsea proporciona una guía clara y estructurada que incluye:

1. Las políticas nacionales que rigen la gestión de los ecosistemas acuáticos.
2. Los programas y proyectos principales que actualmente se desarrollan en el país.
3. El marco técnico-conceptual, que ofrece las bases para un monitoreo efectivo desde todos sus componentes.
4. Un ejercicio cartográfico con criterios de zonificación para la definición de unidades de análisis.
5. La identificación de presiones por área hidrográfica y los principales fenómenos de transformación.
6. Una propuesta de variables e índices mínimos nacionales de monitoreo, junto con índices intermedios y complementarios para abordajes regionales.
7. Un análisis de los sistemas de información existentes, evaluando la disponibilidad y calidad de los datos necesarios para la aplicación

de indicadores a corto, mediano y largo plazo.

8. La hoja de ruta para la implementación y validación del Promsea en ventanas piloto.
9. El listado de instrumentos de monitoreo adoptados y adaptados para orientar la recolección y análisis de información.
10. Una serie de salvedades y recomendaciones para garantizar una implementación efectiva.

El alcance del Promsea se basa en la creación de una herramienta dinámica y adaptable, diseñada para ajustarse continuamente en función de los avances tecnológicos, la disponibilidad de nuevos insumos, el impacto de las actividades humanas en los ecosistemas acuáticos y los resultados derivados de su implementación. Esta capacidad de ajuste continuo permite que la herramienta evolucione para enfrentar los desafíos emergentes y garantizar su relevancia en la gestión de los ecosistemas acuáticos.

En este sentido, se espera que:

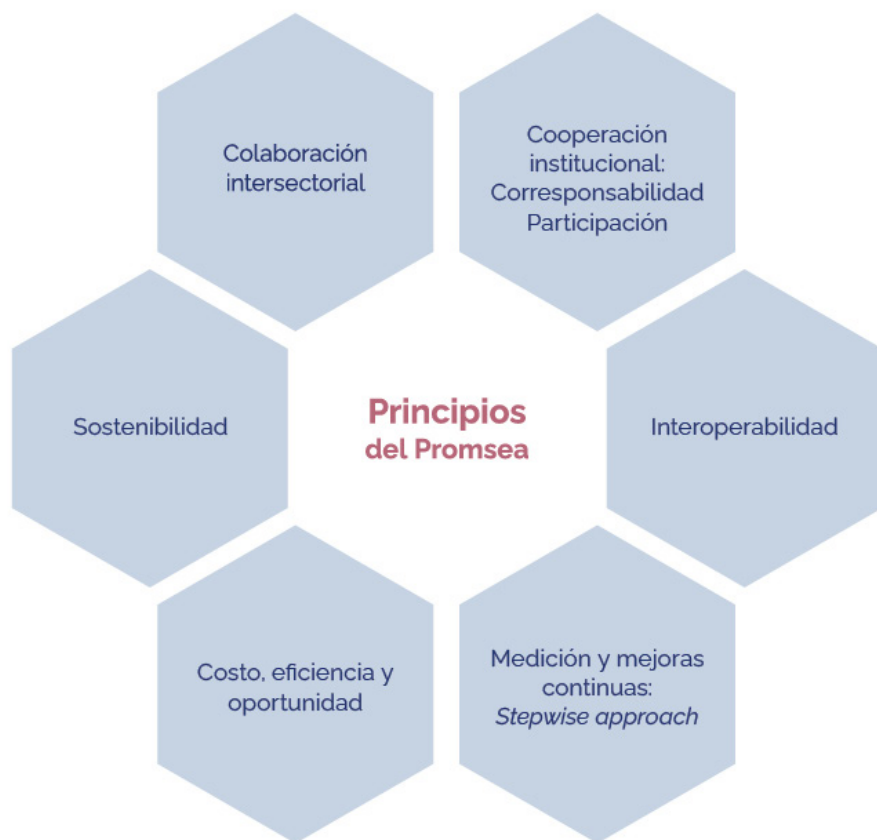
- Que se constituya en el lineamiento conceptual y metodológico para el monitoreo y seguimiento del estado de los ecosistemas acuáticos priorizados para el monitoreo en el país, por área hidrográfica.
- Que ofrezca herramientas de evaluación que permitan la caracterización y evaluación espacio-temporal de los principales fenómenos de transformación que afectan su integridad.
- Que presente una propuesta metodológica que involucre estrategias de monitoreo y seguimiento a través de las cuales se estimen los indicadores planteados (entre los cuales se encuentran aproximaciones basadas en tecnologías de observación de la tierra) a partir de

información recopilada por el Sina y el Sistema de Información Ambiental de Colombia (Siac), así como de la selección de ventanas piloto para la implementación de métodos que permitirán la validación y el ajuste del Promsea.

- Que a partir del levantamiento y análisis de la información del estado de los ecosistemas acuáticos, se fortalezcan los informes de país en el marco de los compromisos con la Convención Ramsar.
- Que el Promsea guíe a las autoridades ambientales e institutos de investigación, que hacen parte del Sina, para que ajusten sus hojas de ruta e implementen los procesos de monitoreo y seguimiento del estado de los ecosistemas acuáticos, de acuerdo con su jurisdicción.

Ha de tenerse en cuenta que el Promsea se guía por seis principios que posibilitan su alcance y objetivos. El primero es la colaboración intersectorial, que fomenta la interacción entre distintos sectores. El segundo está relacionado con la cooperación institucional, basada en la corresponsabilidad y la participación activa de los actores. El tercero es la interoperabilidad que asegura la integración y operación eficaz en diferentes contextos. El cuarto es la medición y mejora continua, para ello se adopta un enfoque escalonado (*Stepwise approach*) que posibilita mejorar los procesos en el tiempo. El quinto es la priorización del costo-eficiencia, para optimizar los recursos y tiempos. El sexto y último principio es la sostenibilidad, para garantizar la permanencia de los resultados obtenidos a largo plazo (ver Figura 2).

Figura 2. Principios para la construcción del Promsea



Fases de elaboración del Promsea

El proceso de formulación del Promsea se estructuró en cuatro fases principales (ver Figura 3), las cuales se definen en las siguientes secciones.

Figura 3. Fases planteadas para el proceso de construcción del Protocolo



Fase I: Identificación de bases técnicas, conceptuales y metodológicas

Como resultado de la primera fase del proceso de formulación del Protocolo, en 2019, se generó un documento base que recopiló los pilares técnicos y conceptuales necesarios. El borrador inicial fue construido a partir de una extensa revisión de información documental (escritos ya realizados o en desarrollo) adelantados por las instituciones que conforman el Sina, así como por otros acto-

res estratégicos (fundaciones, Organizaciones No Gubernamentales (ONGs) y la academia, tanto pública como privada). Esta recopilación, junto con visitas a las cinco áreas hidrográficas del país, permitió al Ideam elaborar un documento de consulta, ajustado a la realidad del territorio nacional, que identificado tanto las fortalezas en la gestión de los ecosistemas acuáticos como las necesida-

des específicas de articulación interinstitucional. Estas necesidades representan oportunidades para mejorar la construcción de instrumentos de gestión y herramientas técnico-científicas para el monitoreo integral de estos ecosistemas y sus componentes.

La primera fase del Promsea tuvo como objetivo general la identificación de bases técnicas, conceptuales y metodológicas necesarias para su formulación. A continuación, se destacan las principales actividades y resultados obtenidos:

- Identificación de iniciativas, metodologías y protocolos existentes para el monitoreo de los ecosistemas acuáticos, abordando las dinámicas hidrológicas, hidrobiológicas, biofísicas y socioeconómicas a nivel local, regional, nacional y global.

■ Fase II: Documento Promsea

La segunda fase tuvo como objetivo general el desarrollo del documento del Promsea, en su primera versión. A continuación, se relacionan las principales actividades y resultados obtenidos:

- Diseño de una metodología de zonificación cartográfica como insumo base para la construcción del Promsea.
- Identificación de las principales presiones actuales sobre los ecosistemas acuáticos del país, las actividades socioeconómicas relacionadas de manera directa y/o indirecta y la información existente con el fin de considerar su inclusión en el marco de la propuesta metodológica.
- Generación del marco técnico conceptual y operativo para la identificación de las variables, índices e indicadores mínimos que desde

- Revisión conceptual y aplicada de las escalas utilizadas en los procesos de monitoreo, incluyendo escalas ecológicas, temporales y espaciales.

- Análisis comparativo de la cartografía de zonificación de los ecosistemas acuáticos disponibles a nivel nacional y regional, con base en características hidrológicas, hidrobiológicas, biofísicas y socioeconómicas.

- Identificación de criterios, variables e indicadores hidrológicos, hidrobiológicos, físicos y socioeconómicos relevantes para el Promsea, en coordinación con actores y entidades del Sina competentes con la temática.

los componentes hidrobiológico, hidrológico, físico y socioeconómico permitan conocer y evaluar el estado de los ecosistemas acuáticos del país.

- Propuesta de un modelo operativo de integración de variables asociadas a indicadores de monitoreo de los ecosistemas acuáticos del país.

- Identificación de la ruta del Siac en términos de las variables, índices e indicadores mínimos seleccionados para el monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos del país.

- Socialización del Promsea con expertos nacionales e internacionales en el tema.

- Propuesta de ventanas piloto para implementación y validación del mismo.

- Generación de los lineamientos mínimos para la inclusión de procesos de monitoreo comunitario participativo, en el marco de la implementación y validación del Promsea.

En este contexto, la segunda fase de construcción del Protocolo (2020-2021) se centró en establecer un diálogo interinstitucional para concretar el mar-

co conceptual propuesto, definir las variables, índices e indicadores a implementar y consolidarlo como una herramienta efectiva. Así se busca garantizar la obtención de información base, con mínimos de calidad y oportunidad, permitiendo a los tomadores de decisiones formular medidas, estrategias y normativas apropiadas para la gestión, el seguimiento y la conservación del estado de los ecosistemas acuáticos en el país.

■ Fase III. Consolidación de la estrategia de implementación y validación del Promsea

La tercera fase tuvo como objetivo general consolidar la estrategia de implementación y validación, a través de las siguientes actividades principales:

- Consolidación de resultados de procesos de articulación interinstitucional.
- Constitución de mesas de trabajo interinstitucionales.

- Identificación de insumos y recursos para su implementación, en ventanas piloto, mediante la generación de acuerdos interinstitucionales.
- Ajustes metodológicos finales.

■ Fase IV. Socialización, oficialización y lanzamiento

Para la cuarta fase se realiza el lanzamiento del Promsea, luego de los ajustes necesarios producto de las mesas de trabajo, talleres, acuerdos institu-

cionales y demás procesos asertivos, luego de la validación y así dar el paso al primer ciclo de implementación.

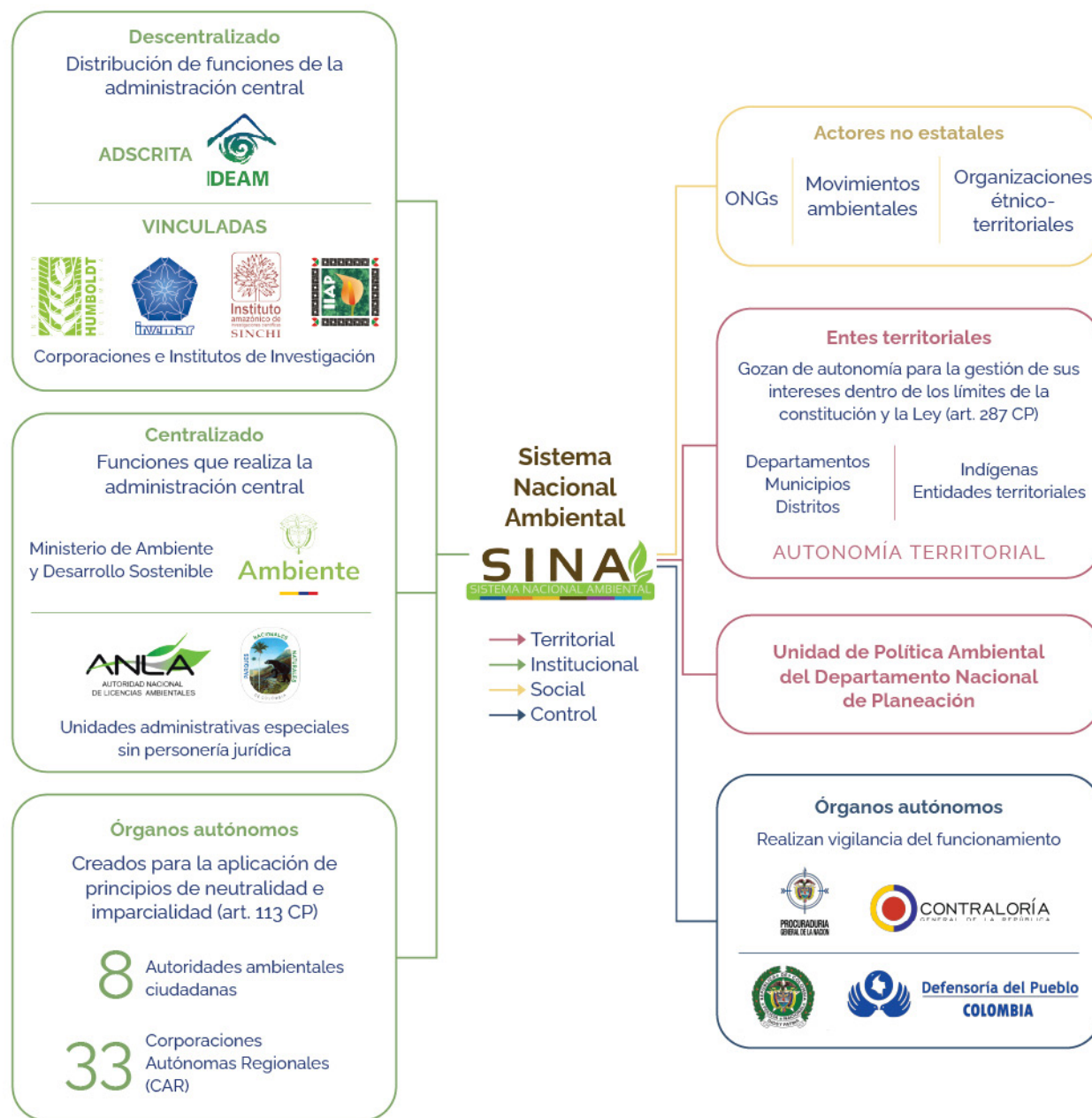
Actores

¿Cuál(les) entidad(des) son las responsables de generar dichos lineamientos y si estos se cumplen en la gestión nacional de los ecosistemas acuáticos?

Las mesas de trabajo con los diversos actores del Sina (ver Figura 4), así como con instituciones privadas y académicas, fueron fundamentales durante el proceso de construcción del Promsea. Cada uno, en concordancia con su misionalidad, ha de-

sarrollado iniciativas orientadas al conocimiento y monitoreo de los ecosistemas dentro de sus áreas de jurisdicción o competencia, incluidos los ecosistemas acuáticos.

Figura 4. Actores del Sistema Nacional Ambiental (Sina)



En este sentido, durante la Fase I del Promsea, en 2019, se llevaron a cabo diversas reuniones, talleres y mesas de trabajo con las entidades del Sina, tanto del nivel central como descentralizado, así como con otras instituciones, incluyendo la acade-

mia, actores no estatales, el sector privado y agencias de cooperación internacional. Se dio especial énfasis a aquellos proyectos ejecutados en asocio con el Ideam, cuyo objetivo principal es el estudio y/o monitoreo de los ecosistemas acuáticos del

país, principalmente a escalas nacional y regional. A continuación, se presenta un resumen de los espacios de interacción definidos con los diversos actores, durante la Fase I y Fase II, junto con el po-

tencial de apoyo interinstitucional identificado para la implementación de la propuesta metodológica (ver Tabla 1).

Tabla 1. Resultados de la articulación con diversos actores nacionales, en el marco de la formulación del Promsea (2019 – 2021)

Entidad	Resultados generales de la articulación
MinAmbiente	Participación en talleres de socialización de la iniciativa (2019)
Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (Anla)	Participación en encuestas virtuales (2019 – 2020)
Parques Nacionales Naturales de Colombia (PNN)	Creación de la Mesa Interinstitucional de Monitoreo de Ecosistemas Acuáticos (MIMEA, 2019)
Instituto de Investigación en Recursos Biológicos (Instituto Humboldt)	Participación en reuniones de la mesa interinstitucional para la construcción del Promsea
Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico (IIAP)	Identificación preliminar de variables, índices e indicadores utilizados por entidades para el monitoreo de los ecosistemas acuáticos del país (2020)
Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (Sinchi)	Identificación preliminar de posibles ventanas piloto para la implementación del Promsea (2020-2021)
Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés (Invemar)	Participación y colaboración en la realización del taller internacional sobre experiencias de monitoreo

En estos espacios se evidenciaron los avances logrados por los actores en torno al tema de interés, los cuales han sido de especial relevancia para el Promsea, al reflejar la capacidad institucional existente en materia de monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos del país. Estos resultados permitieron consolidar una propuesta me-

todológica basada en los pilares del consenso, la articulación y el apoyo interinstitucional, orientada hacia su implementación en el ámbito nacional y regional, con una visión a corto, mediano y largo plazo. En la Tabla 2, se presentan los resultados específicos obtenidos para cada una de las entidades participantes.

Tabla 2. Trabajo realizado por las entidades participantes en el Promsea

Resultados específicos por entidad	
SINA	
MinAmbiente	<ul style="list-style-type: none"> Identificación del Promsea como una herramienta respecto a las cinco líneas estratégicas definidas (de manera preliminar) para el PNMHC, en 2020 Armonización del PNMHC y el Promsea, en 2020 Participación en las reuniones de la mesa interinstitucional para la construcción del programa de monitoreo de humedales entre 2019 y 2021
Anla	<ul style="list-style-type: none"> Identificación de información de los procesos de licenciamiento ambiental como insumo, en términos de estandarización de metodologías y revisión de las posibles herramientas necesarias para garantizar la calidad de la información, entre 2019 y 2020 Socialización de avances en relación con el monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos, del desarrollo de estrategias de regionalización, de evaluación de impactos acumulativos y de análisis de sensibilidad ambiental del recurso hídrico a las tendencias sectoriales regionales, en 2020 Evaluación de posibles acuerdos interinstitucionales para abordar la información correspondiente al tema sectorial, en 2020 Mesas técnicas para el conocimiento de metodologías de evaluación sectorial, entre 2020 y 2021
PNN	<ul style="list-style-type: none"> Oportunidad de articulación de acciones - Convenio firmado por Ideam y PNN (Convenio Interadministrativo No. 002 de 2020)
Sinchi	<ul style="list-style-type: none"> Socialización de experiencias de monitoreo comunitario participativo en la región amazónica, en 2019 Comentarios al documento producto de la Fase I del proceso de construcción del Promsea

Resultados específicos por entidad	
Invemar	<ul style="list-style-type: none"> • Posibilidad de articulación con el GEF 7 para establecer a la Ciénaga Grande de Santa Marta como la ventana piloto de implementación y validación del Promsea, a partir del 2022
Dirección General Marítima de Colombia (Dimar)	<ul style="list-style-type: none"> • Posibilidad de articulación con el GEF 7 para establecer a la Ciénaga Grande de Santa Marta como la ventana piloto de implementación y validación del Promsea, a partir del 2022
Dirección General Marítima de Colombia (Dimar)	<ul style="list-style-type: none"> • Identificación de aportes al monitoreo relacionados con procesos de bioincrustación como vector de transferencia en aguas oceánicas • Desarrollo de indicadores y/o índices para determinar florecimientos algales nocivos, aguas de lastre e información del tráfico marítimo (arribos, zarpes y tipos de buques), en 2020
Autoridad Nacional de Pesca y Acuicultura (Aunap)	<ul style="list-style-type: none"> • Identificación del Servicio Estadístico Pesquero Colombiano (Sepec) como un sistema estratégico de información del componente íctico del país, para proceso de monitoreo y regionalización, entre 2019 y 2020
Otros actores de la sociedad civil	
Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec)	<ul style="list-style-type: none"> • Generación de normas técnicas relacionadas con el monitoreo y evaluación de la calidad del agua a través del Comité Técnico No. 012 Calidad de agua: oportunidad para evaluar y definir metodologías mediante los aportes de los integrantes en las mesas de trabajo, entre 2019 y 2020
Proyectos Ideam con cooperación internacional	
Condesan, Proyecto AICCA Colombia	<ul style="list-style-type: none"> • Identificación de la cuenca del lago de Tota como posible ventana de implementación del Protocolo, en 2019 • Acompañamiento a la implementación del Sistema de monitoreo de la calidad hídrica y al diseño del componente de monitoreo y evaluación de

Resultados específicos por entidad	
	las medidas de adaptación al cambio climático, en la cuenca del Lago de Tota, en 2020
Proyecto GEF Magdalena – Cauca VIVE, Fundación Natura	<ul style="list-style-type: none"> • Aportes de los insumos generados durante el proyecto, en articulación con Ideam, a la formulación del Protocolo entre el 2019 y el 2020 • Apoyo de la Fundación Natura, en el marco del proyecto GEF Magdalena Cauca VIVE al fortalecimiento del equipo de trabajo y el soporte logístico para la realización de eventos, talleres y/o mesas de trabajo, entre 2020 y 2021
Proyecto Páramos y Bosques, Chemonics	<ul style="list-style-type: none"> • Articulación entre los grupos del Proyecto Páramos y Bosques y el equipo de ecosistemas acuáticos con el fin de identificar oportunidades de trabajo conjunto en relación con los humedales de alta montaña en el país (2020)
Proyecto Riqueza Natural Usaid	<ul style="list-style-type: none"> • Sesiones de trabajo conjunto con el objetivo de identificar oportunidades para aunar esfuerzos en torno al monitoreo y seguimiento de las sabanas inundables, en 2020
Órganos autónomos	
Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible	<ul style="list-style-type: none"> • Participación masiva en el taller internacional sobre experiencias de monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos del país • Identificación de oportunidades de articulación para la implementación del protocolo en ventanas piloto seleccionadas, en 2021
Academia	
Investigadores de diversas Instituciones de Educación Superior (IES)	<ul style="list-style-type: none"> • Participación y apoyo logístico en la realización de todos los talleres regionales para la presentación de la iniciativa, en 2019 • Identificación de posibles alianzas academia–Estado para la implementación del monitoreo, en 2021

¿Cómo leer esta herramienta?

El Promsea es una herramienta orientativa diseñada para guiar la implementación de estrategias de monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos en Colombia. Su estructura está organizada para facilitar la comprensión de los conceptos, la metodología aplicada y los procesos de validación e implementación.

El documento se compone de secciones que abordan desde los fundamentos teóricos y técnicos hasta la hoja de ruta para su aplicación. Primero, se presentan los objetivos, alcance y fases de desarrollo del Promsea, junto con el marco técnico-conceptual que define los ecosistemas acuáticos y sus características principales. Luego, se ofrece un análisis del contexto nacional e internacional, y detalla los marcos normativos y los programas de monitoreo existentes.

A continuación, se desarrolla el diagnóstico de las áreas hidrográficas del país, identificando los actores institucionales y las principales presiones que afectan los ecosistemas acuáticos. Posteriormente,

se define la planeación del monitoreo, se establecen las variables a evaluar, la metodología de zonificación y el uso de sensores remotos.

El documento también presenta el monitoreo de los fenómenos de transformación priorizados, abordando metodologías para evaluar la contaminación, la fragmentación y los efectos del cambio climático en los ecosistemas acuáticos. Además, se describe la hoja de ruta para la implementación del Promsea, en ventanas piloto, detallando los criterios de selección y los pasos para su validación en diferentes regiones del país.

Se incluyen consideraciones sobre la adopción de protocolos y metodologías, así como recomendaciones para su aplicación, con un enfoque en los componentes físico, hidrológico, hidrobiológico, socioeconómico y estadístico. Dependiendo del interés del lector, el documento puede ser consultado de manera completa o por secciones específicas, permitiendo su uso tanto para la toma de decisiones como para la ejecución técnica del monitoreo.

Marco técnico conceptual

¿Cuál es el marco conceptual adoptado y adaptado en torno al conocimiento y gestión integral de los ecosistemas acuáticos del país? ¿Cuál será la definición del concepto de estado, en el marco del Promsea?

Para la adecuada implementación del protocolo es fundamental definir, de manera concreta, los conceptos clave, adaptados al proceso y validados con los actores identificados durante su construcción. Este marco conceptual facilitará la gestión y

la toma de decisiones, al establecer una base unificada para la recolección de información, permitiendo que los datos sean comparables y evaluables en el corto, mediano y largo plazo

Ecosistema

Complejo dinámico de comunidades vegetales, animales y de microorganismos en su medio no viviente que interactúan como una unidad funcional materializada en un territorio, la cual se caracteriza por presentar una homogeneidad en sus condiciones biofísicas y antrópicas (Adaptada en las mesas temáticas del Convenio Marco 4206 de 2011, del Convenio de Diversidad Biológica [CDB, 1992]).

Ecosistema acuático

Considerando que la definición de ecosistema acuático comparte la complejidad, a veces ambigua, del concepto general de ecosistema, se construyó una definición operativa más que ontológica (G. Guillot, comunicación personal, junio de 2019), a partir de diferentes nociones existentes. Entonces, para el Promsea, se entiende como ecosistema acuático al complejo dinámico de comunidades vegetales, animales y de microorganismos, en su medio no viviente (dominado por la presencia de aguas corrientes o estancadas, superficiales o subterráneas, dulces o salobres), que interactúan como una unidad funcional, materializada en un territorio, y que presenta homogeneidad en sus condiciones biofísicas y antrópicas. (CDB, 1992; Convención de Ramsar, 2016; Comité Técnico del Mapa de Ecosistemas Continentales, Costeros y Marinos de Colombia [MEC], 2012; Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2005; Dickens *et al.*, 2017).

Ecosistema acuático marino costero

El dominio marino-costero abarca desde el límite interno de la zona costera, pasando por la parte de tierra influenciada por las mareas y las aguas continentales hasta mar adentro (aguas profundas). Incluye las seis principales unidades de recursos costeros de la Nación, en atención a su



San Marcos - Sucre



Caño Correa. Canal del Dique
María la Baja - Bolívar

límite espacial, estructural y funcional: arrecifes coralinos, bosques de manglar y bosques de transición, sistema de playas y acantilados, estuarios, deltas y lagunas costeras, lechos de pastos marinos o praderas de fanerógamas y fondos blandos sedimentarios de la plataforma continental. Para los propósitos de actuación de la política nacional ambiental para el desarrollo sostenible de los espacios oceánicos y las zonas costeras e insulares de Colombia, se discriminan dos tipos de zona costera en el país: la Zona Costera Continental y la Zona Costera Insular (Madden *et al.*, 2008; MinAmbiente, 2000).

■ Ecosistemas acuáticos continentales

Son todos aquellos sistemas de aguas que se distribuyen en los continentes. Pueden estar en la superficie (epicontinentales) o bajo tierra (subterráneos). En el caso de los epicontinentales, en el país se ha propuesto un sistema de clasificación de los principales tipos de ambientes, dentro del cual se encuentran: las aguas corrientes o ambientes lóticos, las aguas estancadas o semi-estancadas, que corresponden a los ambientes lénticos; la transición entre los ambientes acuáticos y ambientes terrestres, llamados transicionales o humedales y los sistemas acuáticos artificiales o embalses (Dinnerstein *et al.*, 1995; Margalef, 1983; Welcomme, 1979; Márquez y Guillot, 2001).

■ Ecosistemas lóticos

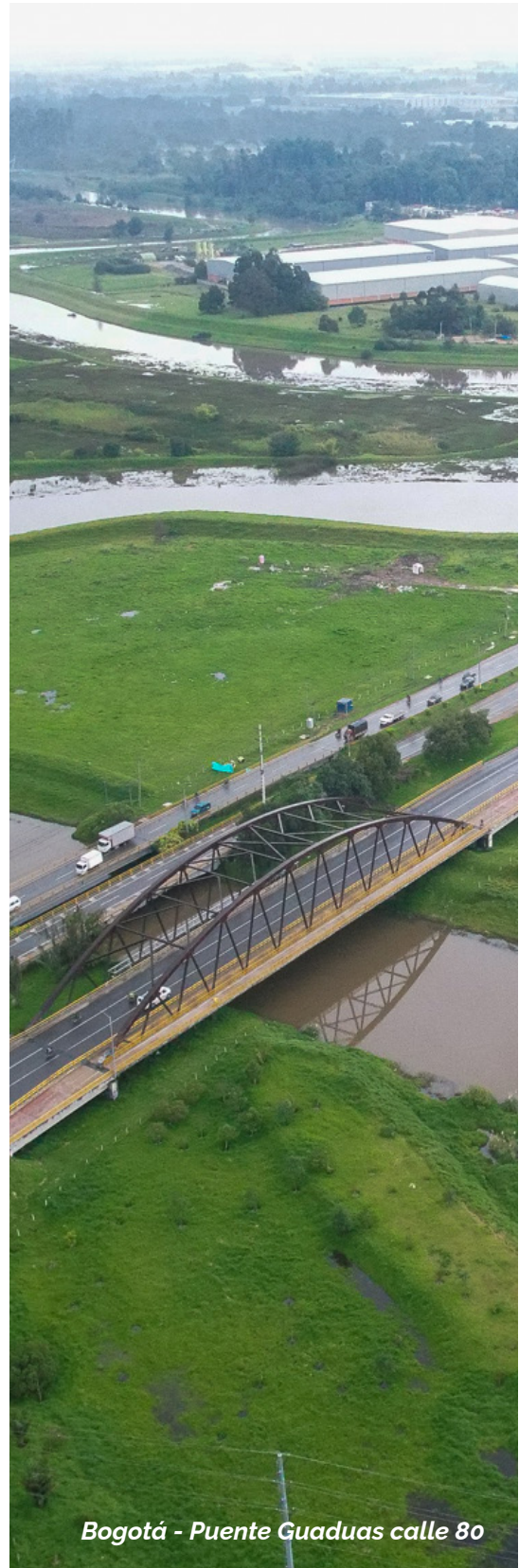
Comprenden todas las formas de agua en las que la totalidad de la masa hídrica se mueve continuamente en una dirección definida por la gravedad. Se componen del río o curso de agua propiamente dicho, que discurre por el canal principal, y el cauce de máxima inundación, que corresponde al área de máxima amplitud del cauce del río en épocas de creciente, dentro del cual se encuentran islas, bancos de arena, brazos y meandros.

En su recorrido sobre la superficie, los ríos conectan con otros cursos de agua ensanchando su lecho, extendiendo su longitud y aumentando su sección transversal, proceso que continúa de manera sucesiva a mayor escala. A través de este proceso se genera finalmente un río en una transformación gradual, que fue descrita para sistemas fluviales de montaña como el concepto del río como un *continuum*. Según esta teoría, el río se encuentra en un gradiente que va desde el nacimiento hasta la desembocadura, en el cual, la materia orgánica alóctona que entra en la cabecera va perdiendo importancia en la medida en que el río se acerca a su terminación. El sistema sufre cambios físicos y biológicos graduales pero visibles, que van desde un sistema heterotrófico en la cuenca alta hasta una condición más autotrófica en la región baja.

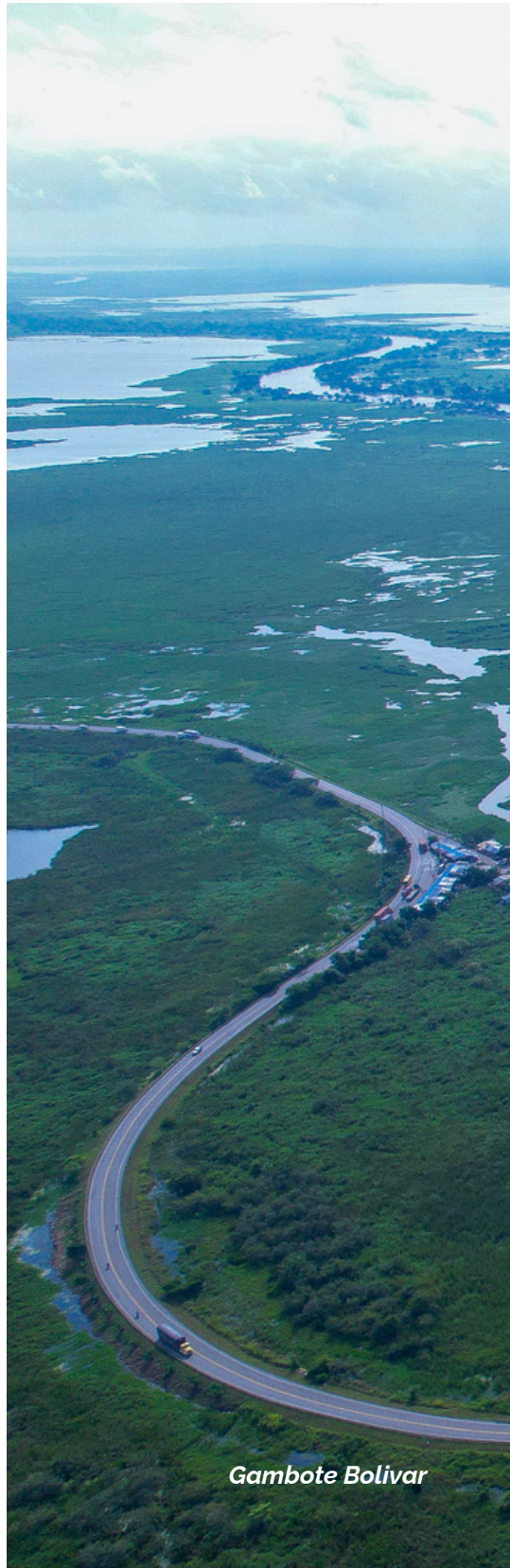
Para sistemas lóticos ubicados en geomorfologías planas, es más aplicable el concepto del pulso de inundación, según el cual la inundación periódica y la subsecuente sequía controlan toda la ecología del sistema fluvial y de los ambientes terrestres adyacentes, definiendo el movimiento, la distribución y la calidad del agua en los ecosistemas fluviales y establece la interacción dinámica que se da en la zona de transición entre el agua y la tierra (zonas de transición acuático-terrestres - ATTZ). Estos sistemas ribereños se convierten entonces en ecosistemas transicionales, también llamados anfibios. (Welch, 1952; Ideam *et al.*, 2020; Vannote *et al.*, 1980; Junk *et al.*, 1989, Junk, 1982).

■ Ecosistemas lénticos

Corresponden a sistemas de aguas estancadas continentales en las que el movimiento del agua no tiene un flujo continuo en una dirección definida. En esencia, el agua está detenida, aunque puede producirse una cierta cantidad de movimiento, como oleajes, corrientes internas o entradas y salidas de los afluentes y los efluentes. No obstante, aunque los caudales, denominados tasas de renovación de agua, son variables y muy lentos en los



Bogotá - Puente Guaduas calle 80



Gambote Bolívar

sistemas lénticos, son continuos. En general, se encuentran alejados del mar y están asociados a un origen glaciar, tectónico o aluvial. El aporte de agua a los lagos y lagunas colombianos viene de los ríos y del afloramiento de aguas freáticas (Welch, 1952; Wetzel, 2001).

■ Ecosistemas transicionales (humedales)

Son áreas donde el suelo está saturado de agua o permanece inundada una parte del año, y las inundaciones y el drenaje pueden tener diferente temporalidad. Así, algunos pueden permanecer por más de seis meses al año. Su función es contribuir a la regulación de los excesos de agua que llegan a la zona y mantener una alta producción de recursos hidrobiológicos. En otros casos, pueden permanecer inundados de tres a seis meses durante el año, tiempo en el que las unidades de tierra se entrelazan con funciones de control de flujos de agua y producción biológica. Otros pueden estar sujetos a inundaciones o encharcamientos durante lapsos inferiores a tres meses en el año (Ideam *et al.*, 2020).

■ Ecosistemas Artificiales (embalses)

Los embalses son áreas cerradas para el almacenamiento de agua, con el propósito de utilizarla posteriormente. Estos reservorios proveen de múltiples beneficios a la sociedad (generación de energía, fuente de agua, control de inundaciones, oportunidades recreativas). Son bien conocidos algunos de sus principales impactos sobre los ecosistemas fluviales, entre los que se encuentran el fraccionamiento del ecosistema, la interrupción de los flujos y de las migraciones de peces, y el deterioro de la calidad del agua. La operación de estos embalses influye sobre los patrones de flujo temporal del río, lo cual tiene, a su vez, repercusiones sobre la salud ecológica de este, tanto aguas abajo como aguas arriba de la interrupción (Jager y Smith, 2008, como se citó en Ideam *et al.*, 2020).

Área hidrográfica

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. Ahora bien, en Colombia se distinguen cuatro vertientes, dos de ellas asociadas a ríos de importancia continental (vertiente del Orinoco y vertiente del Amazonas) y las vertientes del Atlántico y del Pacífico. Se delimita adicionalmente como área hidrográfica la cuenca Magdalena-Cauca, que, aunque tributa y forma parte de la vertiente del Atlántico, tiene importancia socioeconómica por su alto poblamiento y aporte al producto interno bruto (Ideam, 2013b).

Cuenca

Unidad de territorio donde las aguas fluyen mediante un sistema natural interconectado, en la cual pueden interactuar uno o varios elementos físico-socioeconómicos y culturales. En Colombia, la gestión y administración integrada del recurso hídrico acorde al manejo de cuencas hidrográficas, se realiza considerando los aspectos de: planificación, gestión en el uso y aprovechamiento del recurso, prevención y control de la contaminación hídrica, planes departamentales de agua y gestión de riesgos (Ideam, 2013a).

Estado

Define la situación actual derivada del conocimiento del complejo de estructuras y procesos que se dan en las entidades ecológicas llamadas ecosistemas, en este caso, acuáticos¹. Se plantea su evaluación con base en indicadores biológicos, físicos y socioeconómicos. Dichos indicadores permiten establecer las condiciones que requieren los organismos acuáticos para desarrollar sus funciones vitales, las cuales pueden variar geográficamente y de acuerdo con los factores bióticos, abióticos y presiones antrópicas particulares de cada región (Mendoza-Cariño *et al.*, 2014).



Cuenca río Cauca

¹ Esta definición parte de una serie de mesas técnicas internas y otras estrategias de consenso con los actores nacionales descritos en la sección: Actores.

■ Monitoreo

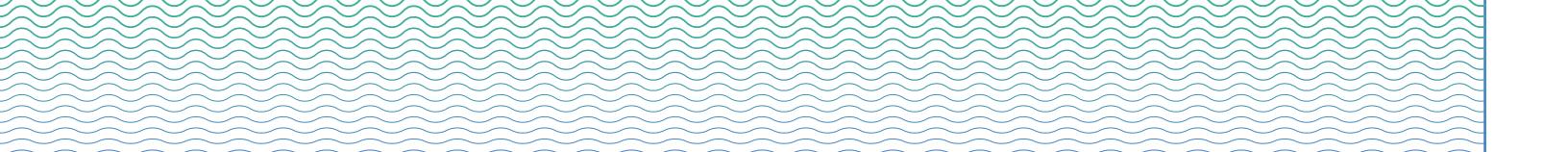
Proceso diseñado científicamente para observar, medir, muestrear y analizar diversos tipos de variables, de manera periódica y mediante métodos técnicos normalizados. El monitoreo se puede realizar por métodos directos de observación, ya sea en puntos estratégicos, estaciones y redes físicas definidas en un programa de monitoreo, o por estaciones espaciales o métodos indirectos, mediante sensores remotos (Ideam e Invemar, 2017a).

■ Seguimiento

Procesos analíticos realizados con los datos aportados por el monitoreo, tomados de forma sistemática y continua por lo menos en dos periodos de tiempo (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam], Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS] y Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales [UDCA], 2015).



Parque Natural Amacayacu - Amazonas



*Canal del Dique - Caño Correa.
María la Baja - Bolívar*



Pozos Azules - Boyaca - Villa de Leyva



Contexto

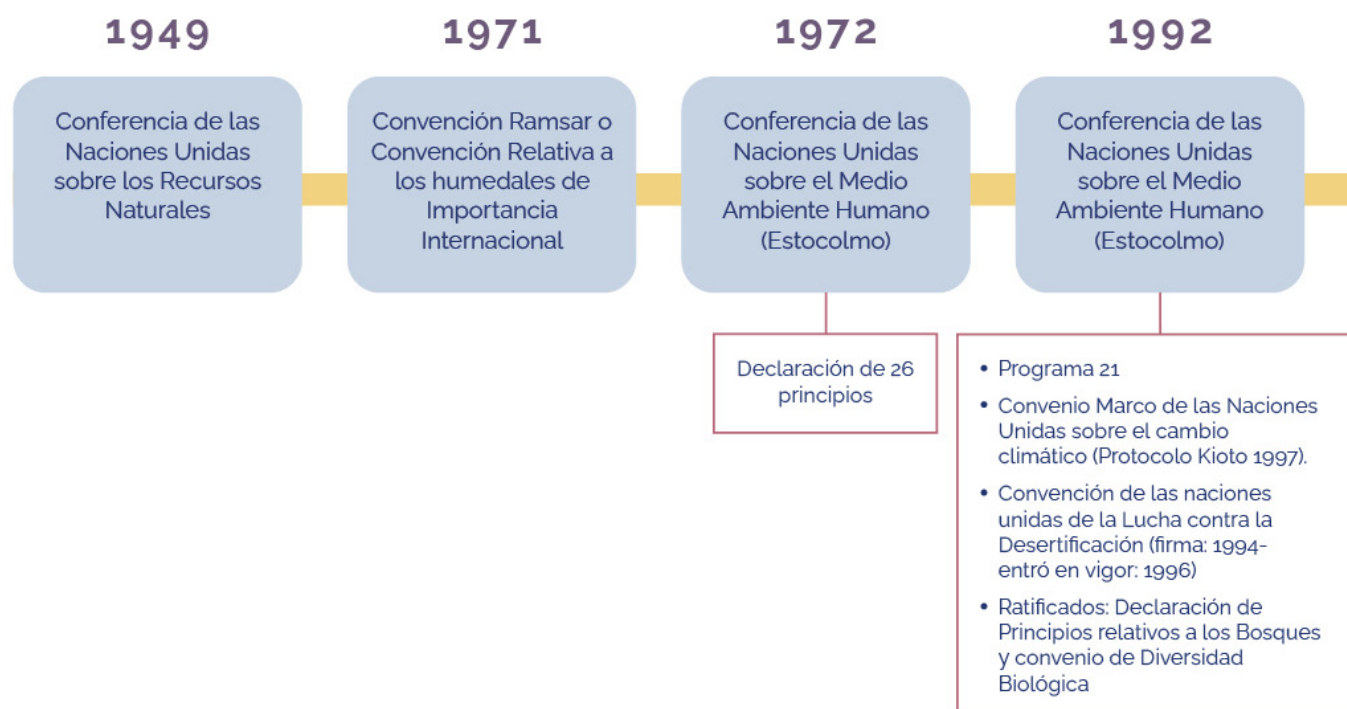
Contexto internacional

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre los Recursos Naturales de 1949 fue el primer encuentro mundial sobre temas ambientales, tras la Segunda Guerra Mundial. Allí se sentaron las bases para la competencia de las Naciones Unidas en asuntos ambientales. Este evento fue precursor de acuerdos y encuentros históricos como la Convención Ramsar (1971), la Conferencia de Estocolmo (1972) y la Cumbre de Río de Janeiro (1992), considerados los hitos en la gestión ambiental global (Rodríguez-Becerra y Espinoza, 2002). Ver Figura 5 que detalla la línea de tiempo de los hitos ambientales globales. La Convención Ramsar, creada para la protección de humedales de importancia internacional, organiza sus acciones estratégicas en torno a tres pilares fundamentales:

- El uso racional de los humedales mediante políticas, legislación nacional, planes de manejo y educación pública.
- La designación y manejo sostenible de humedales incluidos en la lista de humedales de importancia internacional.
- La cooperación internacional en la gestión de humedales transfronterizos y especies compartidas (Convención Ramsar, 2015).

Actualmente, la red Ramsar constituye el sistema de protección de humedales más importante a nivel global, con 2.424 sitios designados que abarcan más de 254 millones de hectáreas (Convención

Figura 5. Línea de tiempo de hitos ambientales globales



Ramsar, 2021). Estos sitios son fundamentales para la conservación de funciones y servicios ecosistémicos que benefician tanto a la biodiversidad como a las comunidades humanas, garantizando beneficios a largo plazo mediante su manejo y uso sostenible.

Por su parte, la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (1992), conocida como la Cumbre de la Tierra, marcó un punto de inflexión al consolidar el desarrollo sostenible como una prioridad global. En este espacio se definieron lineamientos y compromisos fundamentales, y surgieron instrumentos como la Agenda 21, un programa dirigido a fomentar la sostenibilidad y consolidar un nuevo modelo de desarrollo para el siglo XXI. Colombia, junto a otros 172 países miembros de las Naciones Unidas, la suscribió y de esta manera impulsó políticas ambientales, económicas y sociales orientadas al desarrollo sostenible del país y el mundo. Estos lineamientos fueron deter-

minantes para estructurar la arquitectura institucional ambiental del país, que quedó plasmada en la Ley 99 de 1993 (MinAmbiente, 2012).

Posteriormente, en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible – Río+20 (2012) se discutió, por primera vez, el concepto de economía verde, y Colombia tuvo un papel destacado al proponer la creación de un mandato para desarrollar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En 2015, durante la Cumbre de las Naciones Unidas sobre Desarrollo Sostenible, la Asamblea General adoptó la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, un plan global suscrito por 193 Estados Miembros. Esta agenda establece una visión transformadora que integra las dimensiones económica, social y ambiental como pilares de la sostenibilidad, y se proyecta como una guía para los próximos 15 años (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [Cepal], 2019).

2002

Conferencia de las Naciones Unidas sobre Desarrollo Sostenible (Johannesburgo)

Plan de Acción Programa 21 (Agenda 21)

2012

Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible (Río+20)

- Economía verde
- Objetivos de Desarrollo Sostenible (propuesta Colombia)

2015

Cumbre de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible

Agenda 2030, Objetivos de Desarrollo Sostenibles definidos

Si bien la Agenda 2030 es global, representa una oportunidad histórica para la América Latina porque prioriza temas como la reducción de la desigualdad, el crecimiento económico inclusivo, el trabajo decente, la sostenibilidad urbana y la acción climática. Además, los 17 ODS proporcionan

una herramienta de planificación para los países, facilitando la evaluación de su punto de partida y la propuesta de estrategias para alcanzar una nueva visión de desarrollo sostenible (Cepal, 2019). En la Figura 6 se muestra la relación de los ODS y la protección de los humedales.

Figura 6. ODS en los que se enmarca la protección de humedales



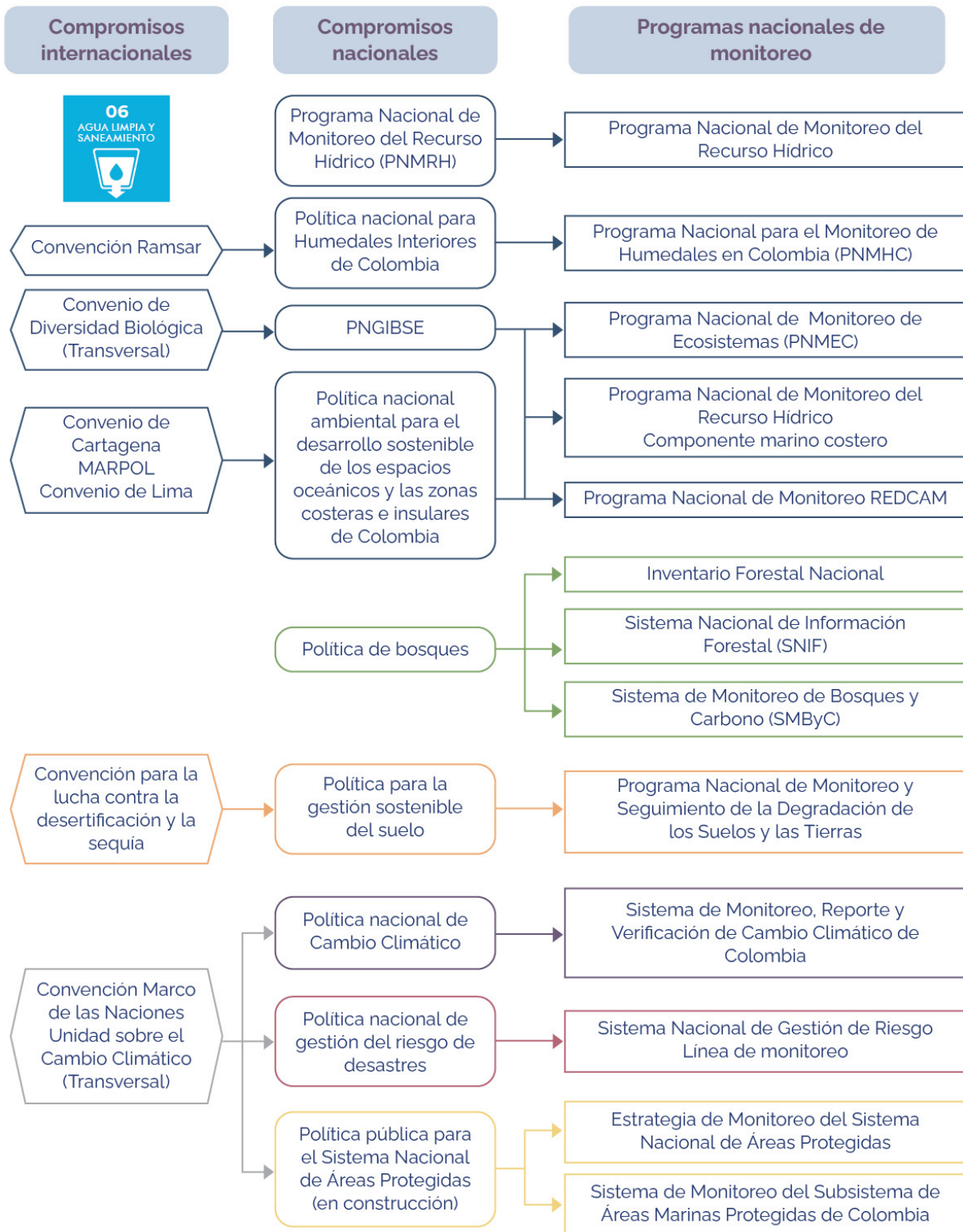
Nota: En recuadro resaltado los ODS que tienen impacto directo sobre los ecosistemas acuáticos.
Fuente: Modificado de Cepal (2019).

Contexto Nacional

En Colombia, la gestión de los ecosistemas acuáticos se ha estructurado a partir de políticas, programas y sistemas que responden a los compromisos internacionales adoptados por el país. Las políticas son las directrices generales y básicamente se constituyen en mecanismos de intervención que reflejan los consensos sociales sobre qué y cómo cumplir los mandatos constitucionales y legales (DNP, 2013). Los programas son la materialización

de dichas políticas, por eso se identifican con un conjunto articulado de proyectos que buscan alcanzar objetivos comunes y garantizar los beneficios propuestos (DNP, 2013). A continuación, se presenta el contexto nacional actual, donde se articulan los compromisos internacionales y nacionales con los programas de monitoreo, enfocados en la gestión sostenible del recurso hídrico y sus ecosistemas (ver Figura 7).

Figura 7. Compromisos nacionales e internacionales cuyos procesos aportan al monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos del país



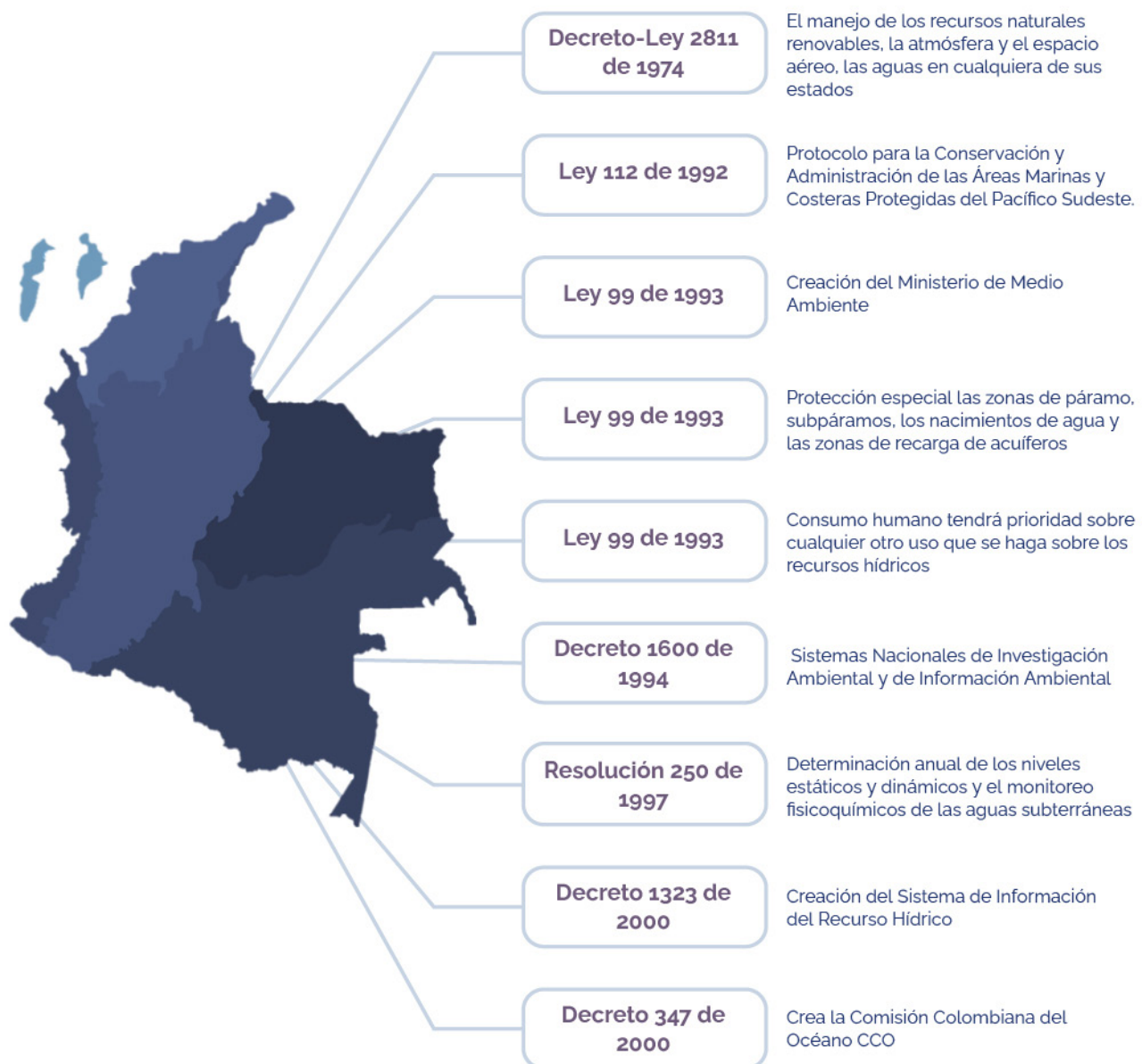
Protocolo de monitoreo y seguimiento del estado de los ecosistemas acuáticos de Colombia

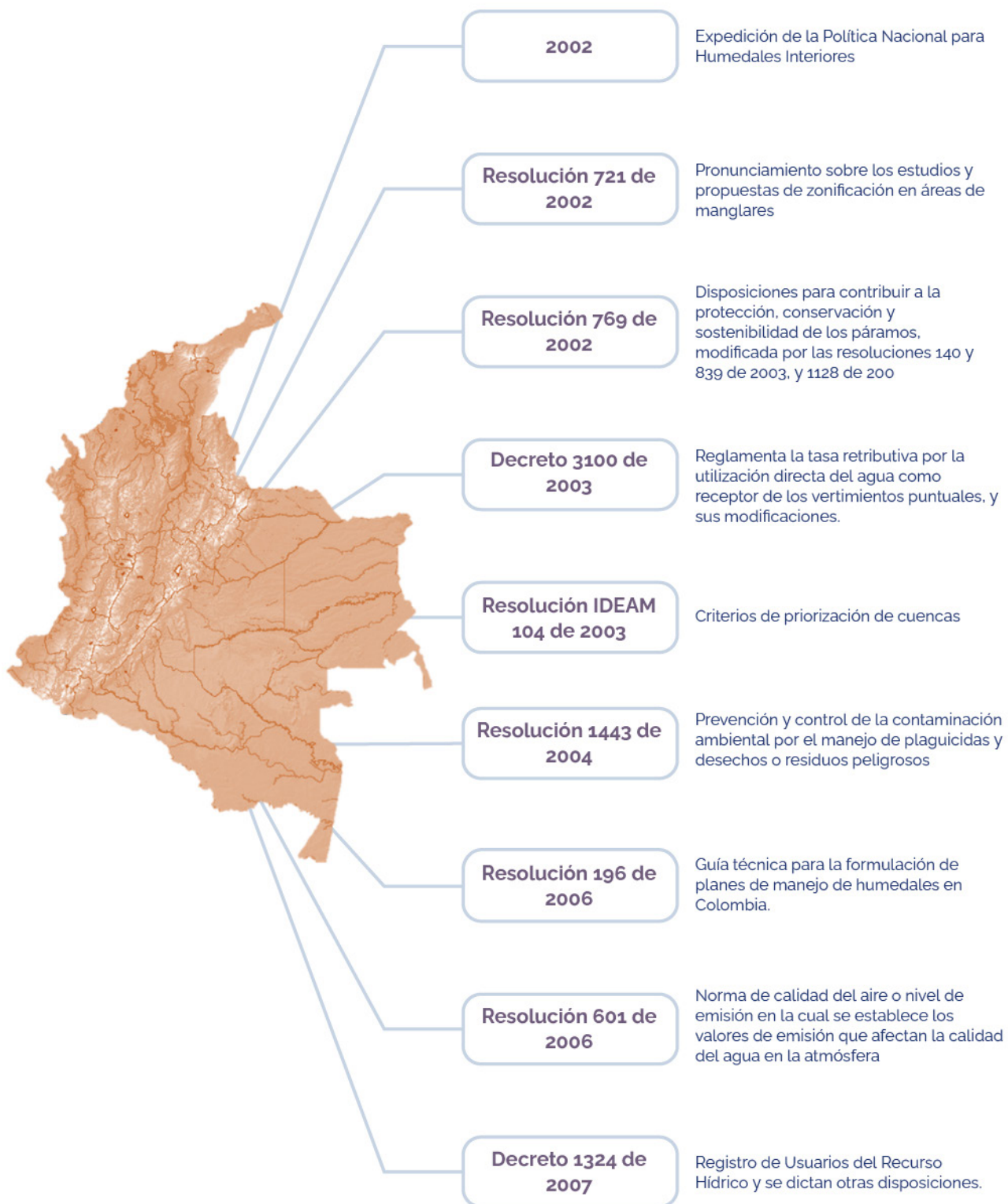
Normativa

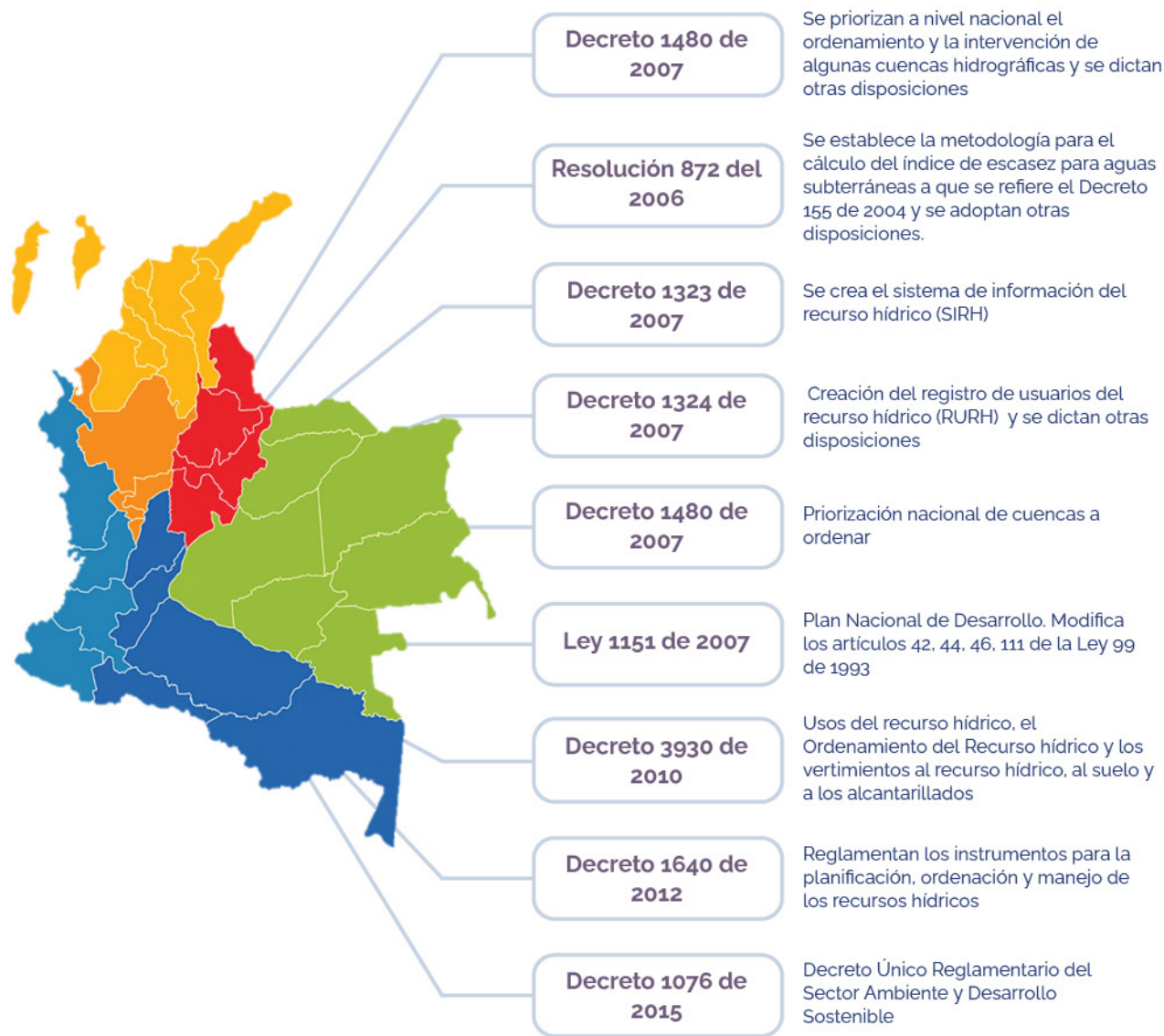
Partiendo de que el agua es el eje central de la gestión ambiental (Rozo, 2016), en el país se han desarrollado diversas estrategias, instrumentos y

normas relativas a los ecosistemas acuáticos. En la Figura 8 se presentan los avances relevantes en la materia.

Figura 8. Recorrido normativo: el agua como recurso, su monitoreo, conservación, uso y aprovechamiento de los ecosistemas acuáticos en el país.







Programas nacionales de monitoreo

En la actualidad, a nivel nacional, existen diversos programas diseñados por MinAmbiente que responden a normativas e iniciativas relacionadas con

el monitoreo de los ecosistemas acuáticos del país y que se enmarcan en el Promsea.

Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico (PNMRH)

El PNMRH se creó ante la necesidad de implementar un sistema de monitoreo sistemático, coherente y adecuado que respaldara la ejecución y el seguimiento de la Política Nacional para la Gestión

Integral del Recurso Hídrico, en conjunto con los demás programas del Plan Hídrico Nacional 2010-2022 (Ideam, 2016).

En este sentido, el PNMRH constituye una directriz que integra y orienta estrategias y acciones a nivel nacional y regional, con el objetivo de mejorar la generación de conocimiento e información sobre el recurso hídrico. Esto permite definir su estado, dinámica e impactos asociados. El programa abarca líneas temáticas para el monitoreo del recurso

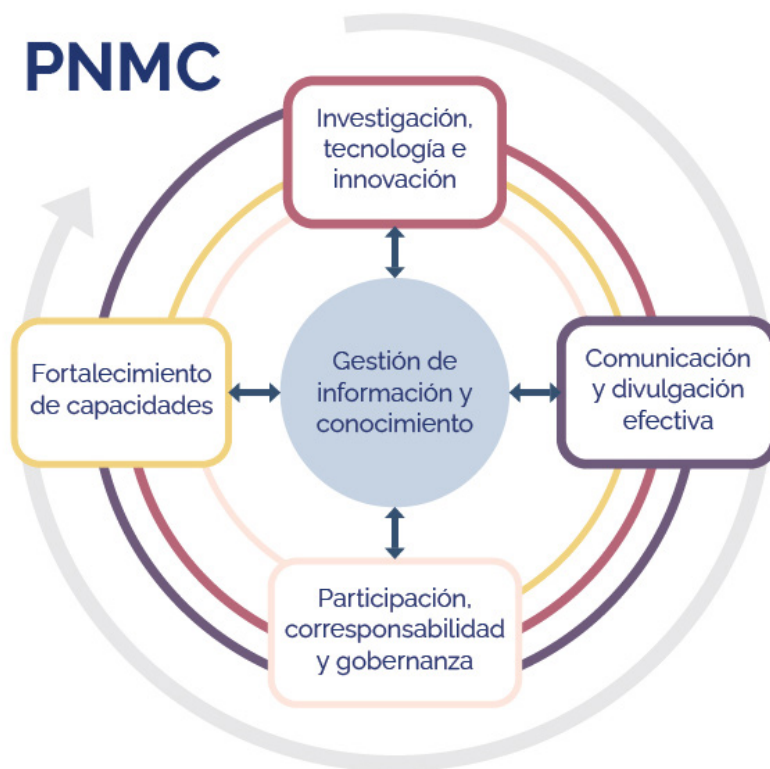
hídrico, como agua superficial, aguas subterráneas, cuerpos lénticos, humedales, calidad del agua, bioindicación y sedimentos (Ideam, 2016). Esta iniciativa que fue desarrollada en articulación entre MinAmbiente y la Subdirección de Hidrología del Ideam se encuentra en ejecución desde el año 2010.

Programa Nacional de Monitoreo de Ecosistemas (PNMEC)

El PNMEC ha sido liderado por MinAmbiente, desde 2021, con el apoyo del Sina y en el marco de la Mesa Interinstitucional de Monitoreo de Ecosistemas Acuáticos (Mimea), que fue creada en 2019 por el Ideam. Su desarrollo ha contado con el respaldo de la Fundación Natura y el Instituto Humboldt

como parte del proceso de construcción del Promsea. Esta iniciativa se enmarca en los lineamientos de la PNGIBSE. Se espera su adopción y el planteo del Plan de Acción en el corto plazo (ver Figura 9).

Figura 9. Líneas estratégicas de la PNMEC



Fuente: Adaptado de MinAmbiente (2020).

El objetivo general del PNMEC es definir los lineamientos generales para orientar integralmente y en el largo plazo el monitoreo continuo y efectivo de los ecosistemas de Colombia, que mejore el conocimiento sobre el estado y cambios en la biodiversidad y los servicios ecosistémicos que los

constituyen, para orientar la toma de decisiones relacionadas con la gestión integral de la biodiversidad, el desarrollo sostenible de los territorios y la competitividad del país, entre otras (MinAmbiente, 2020²).

Programa Nacional para el Monitoreo de Humedales en Colombia (PNMHC)

El PNMHC nace bajo la sombrilla del PNMEC y se encuentra enmarcado en el contexto normativo y en los instrumentos de gestión (ver Figura 10). Este fue formulado en 2019, y adoptó los conceptos establecidos en la Convención Ramsar (1971/2006) que traza los lineamientos internacionales. Recuérdese que ésta fue suscrita en 1971, pero en Colombia solo entró en vigor el 18 de octubre de

1998. Con ella, el país asumió el compromiso de “tomar las medidas necesarias para informarse lo antes posible acerca de las modificaciones de las condiciones ecológicas de sus humedales” (art. 3.2, p. 27). De ahí que, el Instituto Humboldt y el Fondo Adaptación fueron las entidades que desarrollaron los avances conceptuales y metodológicos necesarios para el PNMHC.

Figura 10. Contexto normativo e instrumentos de gestión de los humedales en Colombia



² Presentación en las mesas de trabajo de 2020 de la Mimea, liderada por los institutos de investigación del Sina, en cabeza del MinAmbiente.

Resolución 157 de 2004 y 196 de 2006	<ul style="list-style-type: none"> • Se reglamenta el uso sostenible, conservación y manejo de los humedales • Guía para la formulación de los PM, que incluye el monitoreo de los humedales
PNGRH	<p>La Política Nacional de Gestión del Recurso Hídrico orienta la planificación, administración, seguimiento y monitoreo del recurso</p>
PNGIBSE	<p>La Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos es sombrilla de las políticas ambientales del país y menciona la necesidad de priorizar la conservación de los humedales</p>
PNCC	<p>La Política Nacional de Cambio Climático incorpora la gestión del CC en las decisiones públicas y privadas</p>
Ley 1753 de 2015	<p>Plan Nacional de Desarrollo en el Artículo 172: Protección de los humedales. Establecerá un Programa de Monitoreo para estos ecosistemas que evalúe el estado de conservación y priorizará las acciones de manejo sobre aquellos que se definan como estratégicos</p>

Fuente: Adaptado de MinAmbiente (2020).

Según las orientaciones adicionales para la aplicación del concepto de uso racional de los humedales definidas por la Convención Ramsar, el monitoreo de humedales es "la recolección de información específica con fines de gestión, en respuesta a hipótesis derivadas de actividades de evaluación, y el uso de estos resultados de monitoreo para implementar la gestión" (Convención Ramsar, 2002, p. 6).

Este proceso se distingue de un reconocimiento general de ecosistemas, ya que se fundamenta en un motivo concreto y utiliza un método específico para la recolección de datos e información. El monitoreo de humedales tiene como expectativas principales:

- Incrementar la comprensión y el conocimiento sobre el ecosistema.

- Identificar el estado y tendencias de las características ecológicas de los humedales, permitiendo priorizar acciones necesarias para su gestión.
- Definir metodologías, técnicas y mediciones a través de criterios e indicadores que faciliten el seguimiento y evaluación de factores de tensión, así como la eficiencia de las acciones de manejo.
- Caracterizar y priorizar los impactos derivados de actividades productivas y prácticas de manejo en los humedales.
- Actualizar diagnósticos e información de base como insumo para la formulación de planes de manejo y/o restauración.



Río San Jorge, Ayapel - Córdoba



Diagnóstico

Caracterización de las áreas hidrográficas del país

Las áreas hidrográficas son el marco estratégico para la planificación ambiental a largo plazo en Colombia. Constituyen la base para formular, ajustar y ejecutar políticas, herramientas de gestión y siste-

mas de monitoreo en cada región. A continuación, se describen las cinco principales áreas hidrográficas del país.

Área hidrográfica Caribe

Según el sistema de zonificación del Ideam, esta área hidrográfica está conformada por seis zonas (Atrato-Darién, Caribe-Guajira, Caribe-Litoral, Catatumbo, islas Caribe y Sinú) que abarcan 10.271.871,28 ha y nueve departamentos. El área Caribe sobresale por su riqueza en ciénagas, que constituyen el 95 % del total de cuerpos de agua a nivel regional y de complejos de humedales permanentes o semipermanentes, los cuales cubren un área total aproximada de 35.000 ha.

La región cuenta con importantes estrellas fluviales como la Sierra Nevada de Santa Marta, una de las mayores fuentes hídricas para los departamentos de Magdalena, Cesar y La Guajira y la subregión de La Mojana. Es una zona abundante en humedales muy productivos, pertenecientes a la Depresión Momposina, que son importantes reguladores de los cauces de los ríos Magdalena, Cauca y San Jorge (Viloria de la Hoz, 2003; Meisel-Roca y Pérez, 2006).

Área hidrográfica Magdalena-Cauca

El área Magdalena-Cauca abarca una superficie de 27.101.006,26 ha y está conformada por nueve zonas hidrográficas (Alto Magdalena, Bajo Magdalena, Bajo Magdalena-Cauca-San Jorge, Cauca, Cesar, Medio Magdalena, Nechí, Saldaña y Sogamoso (Ideam, 2013a). Esta área constituye el sistema de drenaje más importante de la región andina y permite el acceso hacia el interior de nuestro territorio desde la costa del Caribe. Los ríos homónimos que la recorren, y en particular el Magdalena, por ser el más caudaloso y tener grandes trayectos navegables de poca pendiente, han sido determinantes en la ocupación del territorio (Cormagdalena, 2007). De esta forma, esta área hidrográfica comprende 19 departamentos y 733 municipios (Gómez-Fernández, 2017). Desde el punto de vista fisiográfico, el área hidrográfica Magdalena-Cauca está limitada al norte por el mar Caribe, donde desemboca el

río Magdalena, al sur por la estrella fluvial del macizo colombiano, al este por el filo de la cordillera Oriental y al oeste por el filo de la cordillera Occidental. El sistema hidrográfico del territorio central colombiano está marcado, en buena parte, por los surcos que dan configuración a su relieve.

El área Magdalena-Cauca es una región interandina en la mayor parte de su extensión, y caribeña en la parte baja. La presencia de los Andes asegura al territorio la variación de la temperatura en función de la altitud. En sentido vertical, esta zona hidrográfica abarca desde el nivel del mar, hasta alturas superiores a los 5.000 msnm, y en ella se encuentran los puntos más altos de la geografía nacional. Esta variación altitudinal hace que se encuentren todos los pisos térmicos y ha propiciado una gran

diversidad de sitios de alta relevancia global para la conservación de especies. Sin embargo, ecosistemas como los dulceacuícolas se encuentran

poco protegidos (4,68 % del área total).

■ Área hidrográfica Orinoco

La cuenca del Orinoco se encuentra entre Colombia y Venezuela. Abarca un área aproximada de 830.000 km², que va desde las estribaciones de la cordillera Oriental de los Andes y su prolongación en Venezuela, hasta la planicie de los Llanos y el Escudo Guayanés. El río Orinoco fluye 2140 km de su fuente, en el extremo suroeste del macizo guayanés, hasta alcanzar el océano Atlántico. Sus cuencas tributarias representan algunas de las áreas biológica e hidrológicamente más diversas del mundo, y forman uno de los sistemas fluviales más importantes del planeta. Esto debido, particularmente, al volumen de agua que fluye hacia el Atlántico (un promedio de 36.000 m³ por segundo). En Colombia, el área hidrográfica va, de norte a sur, desde el río Arauca hasta la divisoria de aguas del río Inírida y, de occidente a oriente, desde la divisoria de aguas de la vertiente oriental de la cordillera Oriental hasta el río Orinoco (WWF-Colombia, 2017). Abarca un área total aproximada de 345.891 km² y se subdivide en 9 zonas hidrográficas (Inírida, Guaviare, Vichada, Tomo, Meta, Casanare, Arauca, Orino directos y Apure) (Ideam, 2013a).

Esta región del país es la que tiene el mayor porcentaje de complejos de humedales, con un

51 % del total, según cálculos realizados por el Ideam, que equivale, en extensión, a 9.838.359 – 10.753.965 ha ocupadas por los ecosistemas acuáticos, tanto de complejos de humedales permanentes como semipermanentes, entre los que se destacan amplias extensiones de sabanas y bosques inundables. Conforme a este origen se pueden asociar dos grupos: los derivados de ríos andinenses o de aguas blancas o barrosas y los derivados de ríos orinoquenses o de aguas oscuras o negras (Botero *et al.*, 1997). En cuanto a cuerpos de agua lóticos se destacan por su magnitud los ríos Arauca, Meta, Tomo, Vichada, Guaviare, Inírida, Orinoco, Ariporo, Casanare, Pauto, Cravo Sur y Cusiana (Igac, 2001).

Teniendo en cuenta su fisiografía, Molano (1998) identificó cinco grandes subregiones o paisajes, que incluyen las zonas transicionales de Amazonía - Orinoquía, Andes-Orinoquía y las formaciones del Escudo Guayanés. Estos paisajes, a su vez, incluyen cuatro ecosistemas principales: los páramos de la cordillera Oriental, los bosques montanos andinos, las sabanas de los Llanos Orientales y las selvas del Escudo Guayanés.

■ Área hidrográfica Amazonas

La Amazonía ocupa el 42,42 % del área terrestre nacional y el 6,21 % de la biorregión amazónica. Su extensión como área hidrográfica es de 34.112.158 ha dividida en 9 zonas hidrográficas (Guainía, Vaupés, Apaporis, Caquetá, Yará, Caguán, Putumayo, Amazonas directos y Napo) (Ideam, 2013a), que representan una intrincada red fluvial y de sistemas conexos, con dos grandes vertientes que desem-

bocan directamente al gran río Amazonas (Alonso y Fabrè, 2005). La primera, la del río Caquetá que junto con sus afluentes abarca 38 % del área total drenada por sistemas fluviales en la Amazonía colombiana, convirtiéndola en la principal fuente de recursos hídricos e hidrobiológicos de esta porción de ecosistema amazónico (Mazorra *et al.*, 2000; Torres *et al.*, 2004). La segunda gran vertiente, la del

río Putumayo que, en conjunto con sus afluentes, drena el 12 % del territorio amazónico nacional. El porcentaje restante, para el total de área drenada, se completa por las cuencas de los ríos Vaupés (8,7 %), Guainía (5,6 %) y las que por criterios fitogeográficos se originan en la Amazonía, pero drenan hacia la cuenca del Orinoco: Guaviare (26,4 %), Atabapo, Mataven y Vichada (9,3 %) (Alonso y Fabré, 2005).

De acuerdo con las características de las aguas, en la gran planicie amazónica se presentan dos grandes tipos de humedales: los formados por los ríos

de origen andino — denominados ríos blancos —, cuyas aguas son barrosas, amarillentas, ricas en nutrientes, cargadas de sedimentos, arenas y limos y tienen un pH o grado de acidez neutro, y los formados por los ríos de origen amazónico — denominados ríos de aguas negras —, que son los que nacen en medio de la planicie, llevan pocos sedimentos y gran cantidad de materia orgánica, lo que les genera una coloración café oscura; son pobres en nutrientes y sus aguas tienden a ser ácidas (Otero, Garay y Ramírez, 2008). Ver detalles en Tabla 3.

Tabla 3. Tipología de ambientes acuáticos de la Amazonía colombiana

Tipo de aguas	pH	Conductividad ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	Cationes (mEq.L^{-1})	Aniones (mEq.L^{-1})	Clorofila a ($\mu\text{g.L}^{-1}$)
Blancas tipo I	5,2 – 7,6	135 – 220	1,1 – 2,12	1,1 – 2,20	2,3 – 23,6
Blancas tipo II	5,0 – 6,6	10 – 20	0,009 – 0,19	0,14 – 0,21	0,009 – 1,2
Negras tipo I	6,0 – 7,1	20 – 62	0,17 – 0,82	0,18 – 147	4,7
Negras tipo II	4,6 – 6,8	5 – 20	0,03 – 0,7	0,14 – 1,47	0,001 – 2,1

Fuente: Núñez-Avellaneda y Duque (2001).

Área hidrográfica Pacífico

El área hidrográfica del Pacífico se divide en 7 zonas hidrográficas (Mira, Patía, Tapaje Amarales – Dagua – Directos, San Juan, Baudó – directos Pacífico, Pacífico directos y Pacífico islas) (Ideam, 2013a) que cubren un total de 7.704.129,35 ha del territorio colombiano. Allí se encuentran diversos tipos de ecosistemas acuáticos, comenzando con

los marinos, donde abundan las aguas someras permanentemente desprovistas de vegetación, con menos de 6 m de profundidad en marea baja, que permiten la formación de arrecifes de coral en sectores de Utría y en los fondos someros insulares de Gorgona y Malpelo y, entre los humedales estuarinos. Los ecosistemas más importantes son

los manglares, que se extienden en el sur del Cabo Corrientes, desde Virudó, hasta El Choncho, al norte de la Bahía Málaga. Así mismo, hay presencia de lagunas costeras o depresiones marinas marginales en los ríos Patía, Juradó y Micay, las cuales tienen un intercambio permanente o temporal con aguas marinas, estando protegidas directamente del mar por algún tipo de barrera (Granizo, 1998, citado por Calvachi, 2010).

Respecto a los ecosistemas acuáticos dulceacuícolas hay que anotar que están representados, principalmente, por ríos como: Baudó, San Juan, Guapi, Patía y Mira, pero están asociados a, aproximadamente, 50 ríos de caudal corto y copioso. Entre las llanuras de inundación más importantes en el Pacífico se tienen las formadas por los ríos Baudó, San Juan y Patía, mientras que, entre los humedales palustres, de los cuales se diferencian dos tipos (emergentes y boscosos), se incluyen tipos de humedales denominados regionalmente como natales, los cuales pueden sufrir el impacto del agua

salobre. Aunque los límites entre estas formaciones no son claros, se sabe que dependen de la dominancia de una determinada especie. Por otra parte, están los guandales y cuangariales que son formas transicionales entre el manglar y las selvas basales del Pacífico, siendo selvas pantanosas, cuyas principales áreas de distribución se encuentran en la cuenca del río San Juan y entre las cuencas de los ríos Guapi y Patía (Granizo, 1998, citado por Calvachi, 2010).

En el área hidrográfica del Pacífico, las conexiones entre las principales ciudades suelen darse al sur por la comunicación de los drenajes principales, siendo los de mayor caudal: Atrato, San Juan, Patía, Baudó, Mira, Iscuandé, Micay, Telembí, Anchicayá, Naya, Calima, Timbiquí, Dagua y Yurumanguí. La extensión y el caudal de estos ríos permite el desarrollo algunas actividades económicas como la minería de oro, plata y platino, la agricultura y ganadería, así como generación de energía eléctrica.

Actores institucionales

La identificación de los actores se realiza con base en aquellas entidades que tienen experiencia en el monitoreo y seguimiento en alguno o en todos los componentes que hacen parte del protocolo,

y que intervienen en el proceso de formulación de políticas públicas, programas, planes y proyectos para la gestión y la toma de decisiones frente a los ecosistemas acuáticos del país.

Entidades estatales nacionales

Las entidades estatales de orden nacional son aquellas que tienen competencia en todas o varias de las áreas hidrográficas del país. Encabeza la lista MinAmbiente que es la entidad pública encargada de definir la Política Nacional Ambiental y promover la recuperación, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso y aprovechamiento de los recursos naturales renovables, a fin de asegurar

el desarrollo sostenible y garantizar el derecho de todos los ciudadanos a gozar y heredar un ambiente sano.

Le siguen las entidades que conforman el Sina sectorial que, desde diferentes aspectos y líneas de acción, procesos y proyectos, se enfoca en el

conocimiento, en términos de usos, servicios y presiones directas e indirectas de los ecosistemas acuáticos del país. También ha de mencionarse a los institutos de investigación como: Invermar (con presencia en las áreas Caribe y Magdalena-Cauca), Instituto Humboldt y el Ideam, que en concurso con la Anla y PNN hacen parte del Sina institucio-

nal, con presencia nacional. Así mismo debe mencionarse a la Aunap, la Agencia Nacional de Tierras (ANT), el Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (Dagma), el Fondo Adaptación y el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (Dane).

■ Entidades estatales regionales

La Tabla 4 muestra un resumen de las entidades estatales regionales que participan activamente en los procesos de monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos, en diferentes regiones del país.

Tabla 4. Entidades regionales que participan en los procesos de monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos en el país

Entidades estatales regionales	Caribe	Magdalena Cauca	Orinoco	Amazonas	Pacífico
Gobernaciones, alcaldías y contralorías	X	X	X	X	X
Asociaciones, federaciones, organizaciones sociales y gremiales	X	X	X	X	X
Área Metropolitana del Valle de Aburrá		X			
Biblioteca Departamental Rafael Carrillo Duque de Valledupar	X				
Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM)		X	X	X	

Entidades estatales regionales	Caribe	Magdalena Cauca	Orinoco	Amazonas	Pacífico
Corporación para el Desarrollo Sostenible del Norte y Oriente Amazónico (CDA)				X	
Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR)		X	X		
Corporación Autónoma Regional de Risaralda (Carder)		X			
Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique (Cardique)	X	X			
Corporación Autónoma Regional de Sucre (Carsucre)	X	X			
Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS)		X	X		
Comisión Colombiana del Océano (CCO)	X				X
Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB)	X	X	X		

Entidades estatales regionales	Caribe	Magdalena Cauca	Orinoco	Amazonas	Pacífico
Centro de Investigación de la Acuicultura de Colombia (Ceniagua)	X				
Instituto de Investigación y Desarrollo en Abastecimiento de Agua, Saneamiento Ambiental y Conservación del Recurso Hídrico de la Universidad del Valle (Cinara)					X
Corporación Autónoma Regional para el Desarrollo Sostenible del Chocó (Codechocó)	X				X
Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (Coralina)	X				
Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (Corantioquia)		X			
Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (Coralina)			X	X	

Entidades estatales regionales	Caribe	Magdalena Cauca	Orinoco	Amazonas	Pacífico
Corporación Autónoma Regional del Río Grande de La Magdalena (Cormagdalena)		X			
Corporación Autónoma Regional de las cuencas de los ríos Negro y Nare (Cornare)		X			
Corporación Autónoma Regional del Magdalena (Corpamag)	X				
Corporación para el Desarrollo Sostenible del Sur de la Amazonía Colombiana (Corpoamazonía)				X	
Corporación Autónoma Regional de Boyacá (Corpoboyacá)		X	X		
Corporación Autónoma Regional de Caldas (Corpocaldas)		X			
Corporación Autónoma Regional del Cesar (Corpocesar)	X	X			

Entidades estatales regionales	Caribe	Magdalena Cauca	Orinoco	Amazonas	Pacífico
Corporación Autónoma Regional de Chivor (Corpochivor)		X	X		
Corporación Autónoma Regional de La Guajira (Corpoguajira)	X				
Corporación Autónoma Regional del Guavio (Corpoguavio)		X	X		
Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica) ahora Agrosavia		X			
Corporación para el Desarrollo Sostenible de La Mojana y el San Jorge (Corpomojana)		X			
Corporación Autónoma Regional de Nariño (Corponariño)		X		X	X
Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (Corponor)	X		X		
Corporación Autónoma Regional de la Orinoquía (Corporinoquia)			X		

Entidades estatales regionales	Caribe	Magdalena Cauca	Orinoco	Amazonas	Pacífico
Corporación para el Desarrollo Sostenible de Urabá (Corpourabá)	X				
Corporación Autónoma Regional del Tolima (Cortolima)		X			
Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA)	X	X			
Corporación Regional del Cauca (CRC)		X		X	X
Corporación Autónoma Regional del Quindío (CRQ)		X			
Corporación Autónoma Regional del Sur de Bolívar (CSB)		X			
Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC)		X			X
Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge (CVS)	X				
Establecimiento Público Ambiental (EPA Barranquilla Verde)		X			

Entidades estatales regionales	Caribe	Magdalena Cauca	Orinoco	Amazonas	Pacífico
Dirección General Marítima (Dimar) Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH)	X				X
Ecopetrol S. A.		X			
Establecimiento Público Ambiental de Cartagena (EPA Cartagena)	X				
Empresas Públicas de Medellín (EPM)		X			
IIAP					X
Instituto de Investigación y Desarrollo en Abastecimiento de Agua					X
Sociedad Portuaria Puerto Nuevo S. A. (PNSA)		X			
Corporación Red de Consejos Comunitarios del Pacífico Sur (Recompas)					X
Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá (SDA)		X			
Secretaría de Medio Ambiente de Medellín		X			

Entidades estatales regionales	Caribe	Magdalena Cauca	Orinoco	Amazonas	Pacífico
Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (Sinchi)				X	

Actores privados y organizaciones no gubernamentales (ONG)

La Tabla 5 muestra un resumen de los actores privados y ONG que participan activamente en los procesos de monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos, en las regiones del país.

Tabla 5. Actores privados y ONG que participan en los procesos de monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos en el país

Entidades estatales regionales	Caribe	Magdalena Cauca	Orinoco	Amazonas	Pacífico
Banco Interamericano de Desarrollo (BID)		X			
Asociación para el Estudio y Conservación de las Aves Acuáticas de Colombia		X			X
Celsia-Empresa de Energía del Grupo Argos		X			
Centro Nacional de Investigaciones del Café (Cenicafé)		X			
Chemonics		X			
Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT)		X			

Entidades estatales regionales	Caribe	Magdalena Cauca	Orinoco	Amazonas	Pacífico
Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de producción Agropecuaria (Cipav)		X			
Conservación Internacional Colombia					X
Corporación Observatorio Sismológico del Sur Occidente (OSSO)	X				X
Corporación Paisajes Rurales		X			
Cooperativa de Ecoturismo y Turismo Comunitario	X				
EPAM S.A. E.S.P.		X			
Empresa de Energía del Pacífico S.A. E.S.P (Epsa)		X			
Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por su sigla en inglés)		X			
Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC)		X			
Fundación Alma		X			
Fundación Argos		X			

Entidades estatales regionales	Caribe	Magdalena Cauca	Orinoco	Amazonas	Pacífico
Fundación Cenipacífico					X
Fundación Humedales		X			
Fundación Malpelo					X
Fundación Museo del Mar y Acuario	X				
Fundación Natura	X	X		X	
Fundación Omacha	X			X	
Fundación Prosierra Nevada de Santa Marta	X				
Fundación Tropenbos				X	
Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF, por la sigla en inglés)		X			
Grupo Pordeco		X			
Horizonte Verde			X		
Instituto para la Investigación y la Preservación del Patrimonio Cultural y Natural del Valle del Cauca (Inciva)		X			X
Isagen		X			
Kopsala			X		

Entidades estatales regionales	Caribe	Magdalena Cauca	Orinoco	Amazonas	Pacífico
Museo del Mar Fospina S.A.S.	X				
Organización Nacional Indígena de Colombia (Onic)		X	X		
PANSA		X			
Proceso Comunidades Negras (PCN)					X
Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)		X			
Proyecto de Conservación de Aguas y Tierras		X			
Resguardo Aticoya				X	
Sociedad Antioqueña de Ornitología (SAO)		X			
The Nature Conservancy (TNC)		X		X	
Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (Usaid)		X			
<i>Wildlife Conservation Society (WCS)</i>		X			
Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF, por su sigla en inglés)		X		X	X

Academia

La Tabla 6 muestra un resumen de las entidades educativas que participan activamente en los procesos de monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos en diferentes regiones del país.

Tabla 6. Entidades educativas que participan en procesos de monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos en Colombia

Entidades estatales regionales	Caribe	Magdalena Cauca	Orinoco	Amazonas	Pacífico
Corporación Universitaria del Huila		X			
Corporación Universitaria Santa Rosa de Cabal		X			
Escuela de Ingenieros de Antioquia		X			
Fundación Universitaria de Popayán		X			
Fundación Universitaria de Popayán				X	
Pontificia Universidad Javeriana		X		X	
Servicio Nacional de Aprendizaje (Sena)				X	
Unidad Central del Valle		X			

Entidades estatales regionales	Caribe	Magdalena Cauca	Orinoco	Amazonas	Pacífico
Universidad Antonio Nariño		X			
Universidad Católica de Oriente		X			
Universidad CES		X			
Universidad de Antioquia - sedes Medellín, Bajo Cauca, Norte, Oriente, Suroeste, Urabá	X	X			
Universidad de Boyacá			X		
Universidad de Caldas		X			
Universidad de Cartagena	X				
Universidad de Córdoba		X			
Universidad de la Amazonía				X	
Universidad de La Guajira	X				
Universidad de Los Llanos			X		
Universidad de Manizales		X			
Universidad de Medellín		X			

Entidades estatales regionales	Caribe	Magdalena Cauca	Orinoco	Amazonas	Pacífico
Universidad de Nariño		X			X
Universidad del Cauca		X			X
Universidad del Magdalena	X				
Universidad del Meta - Unitrópico			X		
Universidad del Pacífico					X
Universidad del Tolima		X			
Universidad del Valle		X			X
Universidad ICESI		X			
Universidad Jorge Tadeo Lozano - sedes Santa Marta y Bogotá	X	X			
Universidad Libre		X			
Universidad Nacional de Colombia - sedes Amazonía, Bogotá, Manizales, Medellín, Palmira	X	X		X	
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia			X		

Entidades estatales regionales	Caribe	Magdalena Cauca	Orinoco	Amazonas	Pacífico
Universidad Pontificia Bolivariana		X			
Universidad Santiago de Cali		X			
Universidad Surcolombiana		X			
Universidad Tecnológica de Pereira		X			
Universidad Tecnológica del Chocó					X
Universidade do Estado do Amazonas				X	

Principales presiones sobre los ecosistemas acuáticos del país

Las principales presiones identificadas en las diferentes áreas hidrográficas del país, incluyendo las zonas marino costeras del Caribe y Pacífico, se encuentran relacionadas con las tendencias de desarrollo económico que presentan las regiones. Tanto en términos de demanda hídrica de estas actividades, como de su incidencia sobre la contaminación de los ecosistemas, la deforestación y los cambios en el uso del suelo, los cuales influyen en la conectividad hidrológica y ecológica. Estas tendencias, sumadas a la sobreexplotación de la biodiversidad acuática, la introducción de especies exóticas y/o

con alto potencial de invasión, y el cambio climático, constituyen importantes presiones a considerar sobre los ecosistemas acuáticos a nivel nacional.

De manera preliminar, se han definido las principales problemáticas ambientales relacionadas con los procesos de transformación de los ecosistemas acuáticos en el país, a partir del análisis de información secundaria y diferentes procesos de identificación y priorización con autoridades ambientales y expertos en la temática (ver Tabla 7).

Tabla 7. Presiones de transformación por tipo de ecosistema acuático identificados en el marco del proceso de construcción del Promsea

Ecosistemas acuáticos continentales	Ecosistemas acuáticos marino, costeros e insulares
Cambio climático	Cambio climático (incluido incremento en la acidez)
Cambio de uso del suelo	Cambio de uso del suelo
Contaminación orgánica e inorgánica	Contaminación orgánica e inorgánica
Deforestación	Deforestación
Demanda hídrica (sectorial y doméstica)	Incremento de los procesos de erosión costera
Incremento de los procesos de sedimentación y terrización	Incremento de los procesos de sedimentación
Introducción de especies exóticas y con potencial de invasión	Introducción de especies exóticas y con potencial de invasión (aguas de lastre y bioincrustación)
Regulación de los ríos	Sobreexplotación de la biodiversidad relacionada con los ecosistemas acuáticos (incluida la presión sobre el recurso pesquero)
Sobreexplotación de la biodiversidad relacionada con los ecosistemas acuáticos (incluida la presión sobre el recurso pesquero)	Tráfico marítimo
Transformación de relación con los ecosistemas acuáticos a causa del turismo	Transformación de la relación con los ecosistemas acuáticos a causa del turismo

A continuación, se describe el panorama actual de las principales presiones, en relación con la información oficial generada sobre los ecosistemas acuáticos del país, en el momento de la formulación del protocolo (2021).

Demanda hídrica

De acuerdo con el Estudio Nacional del Agua del año 2018 (Ideam, 2019a), las actividades más demandantes del recurso a nivel nacional son: la agricultura, la energía, la actividad pecuaria (incluyendo la piscicultura) y el uso doméstico. Se estima que, dentro de cada área hidrográfica, la agricultura representa más del 30 % de la demanda de agua en Caribe (~52 %), Magdalena-Cauca (~42 %), Orinoco (~35 %) y Pacífico (~57 %). La hidroenergía supera el 20 % en Caribe (~25 %), Magdalena-Cauca (~25 %)

y Orinoco (~23 %). La actividad pecuaria (incluida la piscicultura) equivale a ~24 % en Orinoco y ~45 % en Amazonas. Adicionalmente, la mayor demanda hídrica por área hidrográfica se concentra en Magdalena-Cauca, con 25.766,5 Mm³/año, equivalentes a ~69,7 % de la demanda nacional (2016). Este porcentaje corresponde a la participación del área en el total país. Para la composición sectorial dentro de cada área, véase la Tabla 8.

Tabla 8. Porcentaje de demanda hídrica sectorial por área hidrográfica

Sector	Caribe	Magdalena-Cauca	Orinoco	Amazonas	Pacífico
Agricultura	52,28	42,51	34,77	11,99	57,00
Pecuario	5,75	8,25	10,30	27,71	4,01
Piscícola	5,48	7,76	13,35	17,00	3,54
Minería	1,76	1,70	0,08	0,19	11,10
Hidrocarburos	0,05	0,47	8,93	8,25	0,00
Energía	24,75	25,43	22,93	0,00	10,68
Doméstico	7,07	7,56	4,20	29,65	11,58

Fuente: Ideam (2019a).

En cuanto a la actividad agrícola, los cultivos permanentes representan el 57 % del total de la demanda hídrica nacional, seguidos por los pastos con el 25 % y los cultivos transitorios (18 %). Por otra parte, la demanda hídrica del sector pecuario alcanza los 3.071,4 millones de m³, distribuido en

bovinos, porcinos y aves. La principal demanda la ejerce la ganadería bovina (70,4 %), seguida de la porcina (22,3 %) y la avicultura (7,2 %). Finalmente, la actividad piscícola alcanza una demanda nacional estimada de 3.023 millones de m³ (Ideam, 2019a).

Contaminación orgánica e inorgánica

Residuos sólidos

Según el Dane (2005), en los municipios costeros de Colombia, se identifican seis formas principales de eliminación de residuos: recolección por el servicio de aseo (35 %), quema (28 %), botaderos satelitales (17 %), arrojo a cuerpos de agua naturales (14 %), enterramiento (5 %) y otras formas de disposición (2 %). Teniendo en cuenta este panorama, cerca del 65 % de los residuos se manejan de forma inadecuada, lo cual genera diferentes impactos en el medio marino (Invemar, 2019). Los departamentos de Nariño (64 %) y Chocó (31 %), en la costa Pacífica, realizan el mayor aporte de residuos sólidos a los cuerpos de aguas naturales, por la baja o inexistente cobertura del servicio de aseo

o la no disponibilidad de otras alternativas adecuadas para la disposición final de estos residuos (Grau *et al.*, 2015; Dane, 2005; Dane, 2017; Dane, 2017a; Jaramillo, 2002; MAVDT, 2009), evidenciando el desarrollo desigual del sector (MVCT, 2014; Invemar, 2019). Ver detalles en la Tabla 9. Es importante destacar que los principales efectos adversos de la disposición de residuos sólidos en un relleno sanitario son: efecto invernadero, agotamiento de la capa de ozono, olores, daño en la vegetación y ecotoxicidad, contaminación del suelo, contaminación aguas superficiales, contaminación aguas subterráneas, contaminación del aire (DNP, 2015).

Tabla 9. Estadística de disposición final de residuos sólidos en Colombia (en toneladas)

Tipo de sistema	Toneladas dispuestas anualmente		
	2015	2018	2019
Botadero a cielo abierto	95.957	223.702	166.480
Celda de contingencia	81.768	191.434	209.031
Celda transitoria	116.737	24.605	27.411
Cuerpo de agua	2.196	-	-
Enterramiento	103	-	-
Planta de tratamiento	21.978	11.555	14.160
Relleno sanitario	9.649.105	10.853.833	11.106.723

Fuente: Adaptado de Ideam (2021) e Ideam (2019d).

Plásticos y microplásticos

En la actualidad existe un interés creciente, por parte de los diferentes sectores de la sociedad, en prevenir la disposición inadecuada de los materiales plásticos. De manera especial, cuando esta es en fuentes hídricas y ecosistemas sensibles como: ríos, quebradas, lagos, playas, áreas protegidas y océanos. Desde 2016, el Invemar ha llevado a cabo diversos análisis sobre la presencia de macro y microplásticos en los ecosistemas marinos del país, evaluando la carga en sedimentos, agua y tracto digestivo de diferentes variedades de peces.

Los macroplásticos se encontraron en cinco playas en San Andrés y Providencia, en las del Magdalena, Bolívar, Chocó Pacífico, Valle del Cauca y Nariño. También en cuatro en Antioquia y, tres en el Chocó Caribe. Las playas más afectadas por macroplásticos son las de la región del Pacífico, destacán-

Aguas servidas

De acuerdo con el Estudio Nacional del Agua (ENA) (Ideam, 2019a), las actividades que generan mayor demanda hídrica, también son las principales responsables de los flujos de retorno hacia los ecosistemas acuáticos. Por eso se requiere que sean tratados adecuadamente, en plantas de tratamiento de aguas residuales o industriales. De lo contrario, esos flujos regresan con contaminantes que exceden la capacidad de depuración natural de los ecosistemas, y así se afecta gravemente su equilibrio.

El ENA (Ideam, 2019a) analizó las cargas contaminantes de los sectores industrial, doméstico y cafetero, en el país, y encontró que el sector industrial es el mayor contribuyente de carga orgánica neta vertida en las corrientes hídricas. Ello representa el 51 % de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) y el 62 % de la Demanda Química de Oxígeno (DQO). En contraste, el sector doméstico lidera en el aporte de nutrientes, con un 91 % de Fósforo Total (PT), 80 % de Sólidos Suspendedos Totales y 74 % de Nitrógeno Total (NT).

dose La Bocana, donde se registraron 118 tipos de artículos plásticos. De estos, 68 correspondieron a plásticos de un solo uso (botellas, bolsas y recipientes desechables), 42 a artículos de consumo (bombillos, juguetes y cabos) y 8 a elementos de infraestructura como tubos de policloruro de vinilo (PVC) y empaques de tubería (Invemar, 2017).

Los microplásticos más comunes que se han identificado en aguas y sedimentos, en territorio colombiano, fueron fragmentos y filamentos de origen secundario, derivados de la fragmentación de plásticos de mayor tamaño. El análisis de 31 especies de peces, que se encuentran en las aguas de la isla de San Andrés, las bahías de Buenaventura y Santa Marta, reveló que el 48 % presentaba residuos de microplásticos en sus tractos digestivos (Invemar, 2017).

El análisis por áreas hidrográficas revela que, en Magdalena-Cauca, la industria genera la mayor carga de materia orgánica (55 % DQO y 48 % DBO), mientras que el sector doméstico contribuye con el 64 % de sólidos suspendidos y con la mayoría de los nutrientes (61 % NT y 74 % PT). En las áreas hidrográficas del Caribe, Orinoco, Amazonas y Pacífico, el sector doméstico sobresale como principal fuente de materia orgánica, aunque sus aportes son relativamente bajos (Caribe 4 %, Orinoco 2 %, Amazonas 2 % y Pacífico 1 % del DBO total). Magdalena-Cauca que presenta la mayor concentración de población e industria del país es la que determina, en gran medida, el comportamiento nacional en cuanto a vertimientos contaminantes.

En relación con la remoción de cargas contaminantes, el desempeño de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales se detalla en la Tabla 10.

Los macroplásticos se encontraron en cinco playas en San Andrés y Providencia, en las del Magdalena, Bolívar, Chocó Pacífico, Valle del Cauca y Nariño.

También en cuatro en Antioquia y tres en el Chocó Caribe. Las playas más afectadas por macroplásticos son las de la región del Pacífico,

Tabla 10. Porcentajes de remoción de carga contaminante a nivel nacional, en sectores industrial y doméstico (2016)

Parámetro	Remoción industria (%)	Remoción doméstica (%)
Demanda Biológica de Oxígeno	54	19
Demanda Química de Oxígeno	54	18
Sólidos Totales Disueltos	62	22
Nitrógeno Total	3	7
Fósforo Total	1	7

Fuente: Ideam (2019).

Contaminantes emergentes y contaminación difusa del sector agropecuario

Los contaminantes emergentes son sustancias recientemente identificadas cuyos efectos nocivos sobre el medio ambiente están comenzando a estudiarse. Por lo general, no están reguladas (Patiño *et al.*, 2014). Entre estas sustancias se encuentran los fármacos (analgésicos, antihipertensivos, antibióticos), hormonas esteroides, productos de cuidado personal, fertilizantes, plaguicidas, retardantes de llama, aditivos industriales y alimentarios, productos de estilo de vida (cafeína y nicotina) y drogas ilícitas (Bravo, 2009).

Estas sustancias pueden generar impactos significativos, como alteraciones en el sistema inmunológico de animales acuáticos o mutaciones en humanos (Sandoval *et al.*, 2020). Aunque sus concentraciones suelen ser menores a microgramos por litro, su presencia aumenta debido a la incapacidad de los sistemas de tratamiento convenciona-

les para eliminarlas (Barboza, 2015). Además, estos tratamientos implican altos tiempos de retención y la generación de lodos que requieren manejo posterior (Xie *et al.*, 2012).

En Colombia, la preocupación por esta problemática ha crecido, ya que diversos estudios han evidenciado la presencia de contaminantes emergentes en el agua (Jiménez, 2011; Tejada, Quiñonez y Peña, 2014). Según el ENA (Ideam, 2019a), se analizaron sustancias químicas usadas en los sectores agropecuario y de salud pública (fertilizantes, herbicidas y plaguicidas) y en actividades ilícitas como la transformación de la hoja de coca.

Aunque las fuentes oficiales de información son limitadas, se ha registrado un aumento en la demanda de agroquímicos, especialmente fertilizan-

tes y productos para el control de malezas. Entre los plaguicidas más utilizados, a nivel nacional, se encuentran los organofosforados, carbamatos y tiocarbamatos. En los estudios (Ideam, 2018b) se ha encontrado que en los departamentos de Atlántico, Bolívar y Sucre se registran compuestos clorados, mientras que en Antioquia los hallazgos están

relacionados con el uso de coadyuvantes, desinfectantes, fertilizantes y biológicos. Por otro lado, los solventes orgánicos, utilizados para la transformación de productos, son los más requeridos y, eventualmente, pueden contaminar los ecosistemas acuáticos (Ideam, 2018b).

Minería legal e ilegal

Las actividades mineras, tanto legales como ilegales, generan impactos significativos sobre los recursos hídricos en Colombia, por ello la necesidad de hacer seguimiento y evaluación, para proponer soluciones efectivas. Los problemas principales derivan del uso intensivo del agua, los residuos mineros vertidos a los ecosistemas acuáticos y el transporte inadecuado de desechos tóxicos. Además, el contacto del material minado con el oxígeno produce lixiviados que contienen óxidos, sulfuros, sulfatos, sales y otros compuestos, los cuales alteran los acuíferos y la escorrentía superficial (Ministerio de Minas y Energía [MME], Unidad de Planeación Minero Energético [UPME] y la Universidad de Córdoba, 2015).

La Universidad de Córdoba (2015) identificaron grados indeterminados de afectación a las aguas superficiales y subterráneas por la minería de carbón y oro debido a deficiencias en el manejo de vertimientos y, a los altos consumos de agua y energía en esta industria (Unidad de Planeación Minero Energético [UPME], 2014). En particular, la minería de carbón, que se realiza tanto a cielo abierto como bajo tierra, genera efectos inciertos sobre los acuíferos, impactando especialmente los territorios de las tres cordilleras del país. Según el Sistema de Clasificación de Recursos y Reservas de Carbón de Ecocarbón (Empresa Colombiana de Carbón [Ecocarbón], 1995), se requiere un análisis exhaustivo del consumo de agua y los efluentes líquidos contaminados generados por esta actividad (ver Tabla 11).

El Ministerio de Minas y Energía (MME), la Unidad de Planeación Minero Energético (UPME) y la Uni-

Tabla 11. Actividades de minería de carbón por área hidrográfica

Área hidrográfica	Zonas carboníferas	Tipo de minería
Caribe	Bolívar, La Guajira, Cesar, San Jorge (Córdoba)	Carbón térmico
Magdalena - Cauca	Norte de Santander, Cundinamarca, Boyacá, Antioquia	Carbón metalúrgico y térmico
	Santander	Carbón térmico, metalúrgico y antracítico
Pacífico	Chocó, Valle del Cauca y Cauca	Carbón térmico

Fuente: UPME (2015).

La Evidencia de Explotación de Oro de Aluvión (EVOA) se refiere a las actividades de minería de oro que utilizan depósitos aluviales, ubicados en las riberas y cauces de los ríos. Esta secuencia de la industria puede realizarse con manualmente o con maquinaria, pero en ambos casos genera impactos ambientales significativos al alterar los paisajes fluviales y los ecosistemas asociados. En Colombia, las actividades de EVOA se realizan sin autorización en un 66 %, mientras que el 27 % cuenta con permisos técnicos y/o ambientales y el 7 % está en proceso de legalización (Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito [UNODC], 2020).

Según datos reportados por UNODC (2020), en 2019, en Colombia, 98.028 hectáreas presentan evidencia de EVOA con uso de maquinaria. La in-

formación fue identificada a través de teledetección, en 12 departamentos del país. Antioquia está a la cabeza de la lista con 40.201 hectáreas afectadas, le sigue Chocó con 35.105 hectáreas. En cuanto a la EVOA, en cuerpos de agua (ver Tabla 12), se han identificado alertas en departamentos como Amazonas, Guainía, Caquetá, Putumayo, Vaupés, Guaviare y Cauca, especialmente en los ríos: Cotuhé, Apaporis, Caquetá, Inírida, Atabapo y Negro. De estos, el río Caquetá presenta la mayor concentración de alertas, afectando áreas de reserva forestal, sitios Ramsar y PNN. Este fenómeno alerta sobre la necesidad de integrar la información en planes de ordenamiento territorial, estableciendo zonas de exclusión o restricción, junto con medidas de mitigación que reduzcan sus impactos ambientales.

Tabla 12. Áreas hidrográficas con EVOA en tierra

Área Hidrográfica	EVOA tierra (ha)
Caribe	21.646
Magdalena-Cauca	55.798
Orinoco	12
Amazonas	512
Pacífico	20.053

Fuente: UNODC (2020).

Deforestación

La mayor extensión de bosque natural en Colombia se encuentra en las áreas hidrográficas del Amazonas, Orinoco y Pacífico. Según el Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono, entre 2016 y 2018

se registró una pérdida significativa de cobertura forestal, con 224.447 hectáreas en el Amazonas, 186.394 hectáreas en el Orinoco y 80.805 hectáreas en Magdalena-Cauca (Ideam, 2021).

Los datos reflejan una tendencia al aumento de la deforestación en más de 20.000 hectáreas en Amazonas y Orinoco, entre 2016 y 2017. Para 2018, mientras en el Orinoco la deforestación continuó incrementándose, en el Amazonas se observó un ligero descenso. En las demás áreas hidrográficas, como Caribe, Magdalena-Cauca y Pacífico, la

tendencia muestra una disminución en la pérdida de bosques. Entre estos bosques se destacan los riparios y de galería, que desempeñan funciones esenciales en la regulación y amortiguación de los ecosistemas acuáticos, reforzando su capacidad de soporte frente a las actividades humanas y los eventos naturales (ver Tabla 13).

Tabla 13. Deforestación anual en las diferentes áreas hidrográficas del país (año / ha)

Áreas hidrográficas	Deforestación anual (ha)			
	2016	2017	2018	Total
Caribe	45.066	18.613	14.256	77.935
Magdalena-Cauca	31.570	29.508	19.727	80.805
Orinoco	41.442	67.564	77.388	186.394
Amazonas	47.829	95.867	80.751	224.447
Pacífico	12.691	8.421	5.038	26.150

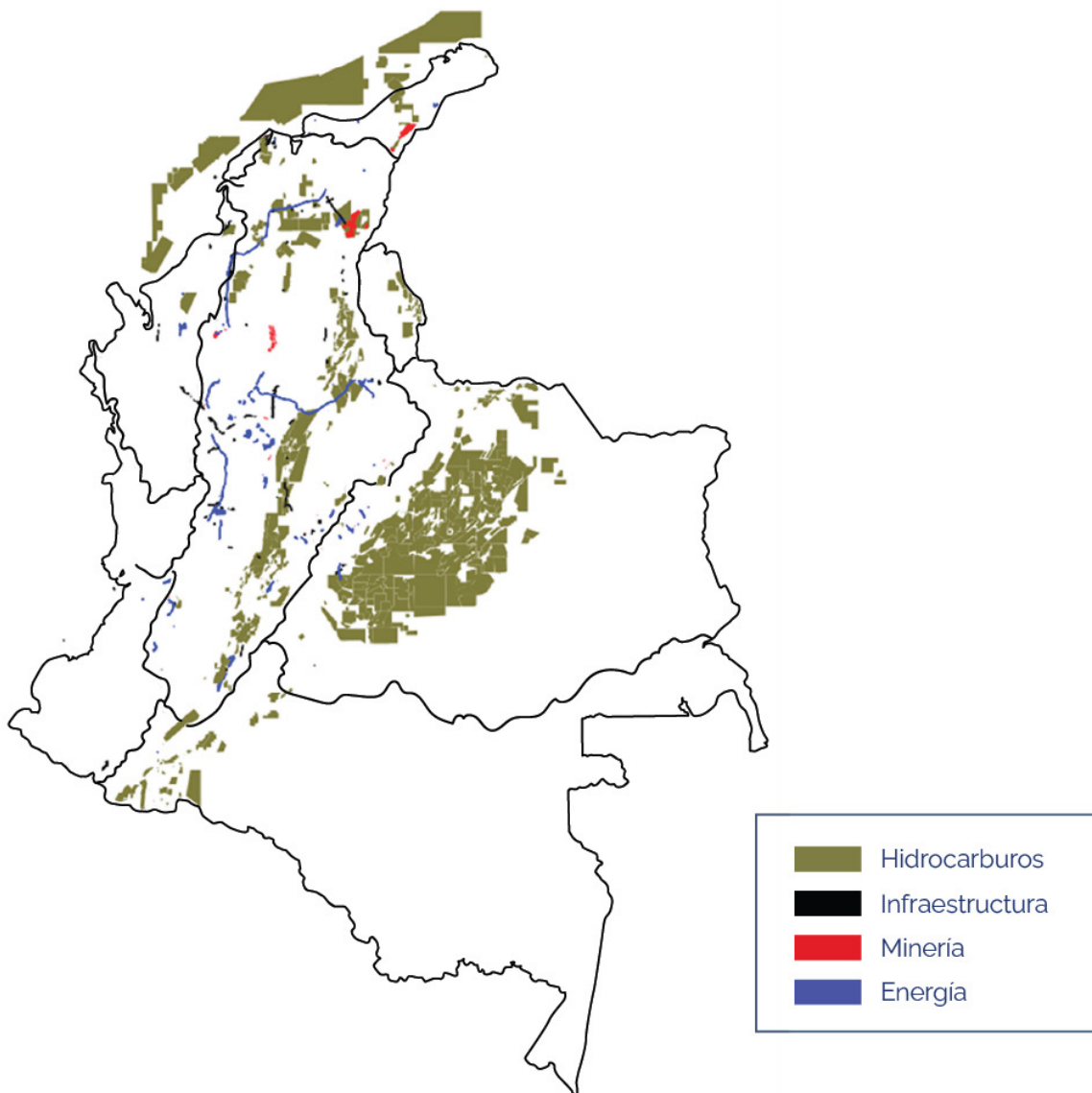
Fuente: Ideam (2021).

Uso del suelo

En Colombia no existe, actualmente, un mapa actualizado de uso del suelo, pero se generan insumos periódicos que permiten aproximarse a las dinámicas territoriales. Hay información sobre áreas licenciadas para proyectos sectoriales, censos y evaluaciones agropecuarias y demográficas. Estas herramientas facilitan la descripción del territorio, en términos de las actividades desarrolladas, y los contextos sociales que caracterizan cada región.

En relación con el licenciamiento de proyectos sectoriales, según la ANLA (2021), la industria petrolera tiene una notable influencia en las áreas hidrográficas de la Orinoquía (zona de piedemonte), Magdalena-Cauca (cordillera Oriental), Caribe (Norte de Santander, La Guajira y Córdoba, incluyendo explotación *offshore*) y Amazonas (zona de piedemonte). Los sectores de infraestructura y energía se concentran en el área hidrográfica Magdalena-Cauca. Mientras que la minería legal ocupa una extensión significativa en el Caribe (ver Figura 11) (Anla, 2021).

Figura 11. Áreas hidrográficas y proyectos licenciados



Fuente: (Anla, 2021).

En relación con el sector agrícola, se encuentra que hay una vasta extensión en las áreas hidrográficas del Magdalena-Cauca, Orinoquía y Pacífico, destacándose los departamentos de Antioquia, Meta,

Tolima, Valle del Cauca, Santander y Huila con el mayor número de hectáreas destinadas a cultivos (ver Tabla 14).

Tabla 14. Departamentos que se destacan por el área destinada a la agricultura en las áreas hidrográficas del Magdalena-Cauca, Pacífico y Orinoco. (Área sembrada expresada en hectáreas)

Área hidrográfica	Área sembrada (ha)						Total
	Antioquia	Meta	Tolima	Valle del Cauca	Santander	Huila	
Magdalena - Cauca	---	---	4.640.362	---	3.805.631	3.592.681	12.038.674
Magdalena - Cauca y Pacífico	5.222.325	---	---	4.283.563	---	---	9.505.888
Orinoco	---	4.902.246	---	---	---	---	4.902.246

Fuente: Evaluaciones Agropecuarias Municipales (UPRA y MADR, 2019).

Los principales sembradíos permanentes en esas regiones corresponden a café, palma de aceite, caña, plátano y cacao, en tanto que los cultivos transitorios son de arroz y maíz (Unidad de Plani-

ficación Rural Agropecuaria [UPRA] y Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR], 2019) (ver Tabla 15).

Tabla 15. Área destinada para la siembra de principales cultivos permanentes y transitorios en los departamentos de Antioquia, Meta, Tolima, Valle del Cauca, Santander y Huila

Tipo de cultivo	Productos	Área sembrada (ha)
Permanentes	Café	5.921.527
	Palma de aceite	2.996.894
	Caña	2.665.756
	Plátano	1.067.613
	Cacao	578.443
Transitorios	Arroz	2.604.443
	Maíz	1.431.358

Fuente: Evaluaciones Agropecuarias Municipales (UPRA Y MADR, 2019).

Los departamentos de Meta, Vichada, Casanare y Arauca concentran 14.637.255 hectáreas destinadas a la actividad pecuaria, donde una gran extensión se encuentra en el área hidrográfica del Orinoco. En las áreas hidrográficas del Magdalena-Cauca, Pacífico y Caribe, especialmente en los departamentos de Antioquia, Santander, Córdoba, La Guajira, Cundinamarca y Cesar hay grandes extensiones ganaderas. En el área hidrográfica del Amazonas, el departamento del Caquetá sobre-

sale con 1.429.665 hectáreas destinadas a la actividad pecuaria (DANE, 2019). El ganado bovino es la principal especie en casi todas las regiones del país, que se destaca por el número de animales. Hay una excepción que es la región Pacífico, donde predomina la avicultura (ver Tabla 16). De manera que, ha de subrayarse el impacto de las dinámicas económicas y ambientales, en cada región, dada la importancia de la actividad pecuaria en el uso del suelo.

Tabla 16. Número de animales (bovinos, aves y otros), según regiones colombianas

Región	Bovinos	Aves (gallinas y pollos)	Porcinos
Andina	9.687.404	7.677.762	385.816
Caribe	7.522.715	3.431.451	533.679
Orinoco	5.927.531	1.748.267	195.352
Amazonas	2.661.240	765.449	31.726
Pacífico	1.440.877	2.457.937	119.027

Fuente: Encuesta Nacional Agropecuaria (UPRA y MADR, 2019).

Tráfico marítimo

El tráfico marino ejerce diferentes presiones sobre los ecosistemas acuáticos, destacándose la introducción de organismos acuáticos exóticos, a través de las aguas de lastre, con un alto potencial de bioinvasión. Asimismo, el transporte por bioincrustación, combinado con el tiempo de residencia en la etapa de arribo, facilita el desprendimiento de especies incrustadas en las superficies de las embarcaciones. Otros impactos significativos incluyen el derrame y descarga de productos que contaminan las aguas costeras, la alteración y pérdida de hábitats críticos, el incremento en las

emisiones de GEI, y la compleja interacción social entre los puertos y los territorios circundantes.

A partir de los arribos de buques internacionales y del movimiento de naves nacionales o de cabotaje se calcula el tráfico marino. En Colombia hay ocho estaciones de control que están ubicadas en las principales áreas portuarias. En el Caribe: Barranquilla, Cartagena, Santa Marta, Coveñas, Turbo y San Andrés. En el litoral Pacífico: Buenaventura y Tumaco. Adicionalmente, debe consi-

derarse la actividad portuaria registrada sobre el río Magdalena. Según los reportes de la Dimar de los últimos tres años, la región Caribe concentra el mayor tránsito de buques, representando más del 78 % del tráfico marítimo nacional (ver Tabla 17).

Dentro de esta región, las zonas de Ciénaga y Cartagena se destacan por ser los principales puntos de actividad portuaria en el país (ver Tabla 18).

Tabla 17. Número de arribos de buques por zona portuaria

Zona Portuaria	2018		2019		2020		% Variación (2018-2019)	% Variación (2019-2020)
	Cantidad	% de participación	Cantidad	% de participación	Cantidad	% de participación		
Región Caribe	9.181	78,6	9.570	79,6	8.359	78,9	4,2	-12,7
Región Pacífico	1.521	13,0	1.379	11,5	1.232	11,6	-9,3	-10,7
Río Magdalena	977	8,4	1.073	8,9	1.005	9,5	9,8	-6,3
Total: arribos buques	11.679	100	12.022	100	10.596	100	2,9	-11,9

Fuente: Modificado de la Dirección General Marítima [Dimar] (2019, 2019a, 2020, 2021 y 2021a).

Tabla 18. Porcentaje de participación anual de las zonas portuarias en el tráfico portuario nacional

Zonas	Porcentaje de participación			
	2018	2019	2020	2021 (enero a marzo)
Barrancabermeja	1		1	1
Barranquilla	6	1	6	6
Buenaventura	13	6	11	7
Cartagena	19	21	27	27
Ciénaga	23	24	23	23

Zonas	Porcentaje de participación			
	2018	2019	2020	2021 (enero a marzo)
Golfo de Morrosquillo	15	17	18	18
San Andrés		1		
Santa Marta	6	6	6	6
Turbo	1	10	1	1

Fuente: Modificado de la Dirección General Marítima [Dimar] (2019, 2019a, 2020, 2021 y 2021a).

Sobreexplotación de la biodiversidad: presión sobre el recurso pesquero

En los ríos de Colombia se registran 1.572 especies de peces dulceacuícolas (DoNascimento *et al.*, 2019), que representan una riqueza biológica

notable. No obstante, todas las especies enfrentan diversas presiones, que varían en intensidad según el área hidrográfica (ver Tabla 19).

Tabla 19. Presiones identificadas sobre el recurso pesquero y especies continentales en amenaza por captura de juveniles

	Caribe	Magdalena-Cauca	Orinoco	Amazonas	Pacífico
Presiones directas identificadas	Pesca de arrastre en todas sus modalidades, pérdida de hábitat: destrucción de los arrecifes coralinos, manglares y praderas de fanerógamas marinas. Especies invasoras como el pez león (Beltrán y Tavera, 2019)	Deforestación, erosión, sedimentación, contaminación por aguas residuales e industriales y desecación de humedales (Galvis y Mojica, 2007; Mojica <i>et al.</i> , 2012; Jiménez-Segura <i>et al.</i> , 2016)	Desecación de humedales, el cambio de coberturas vegetales por cultivos de arroz, palma, caña de azúcar, pastos y plantaciones forestales	Deforestación y minería ilegal de oro, sedimentación y contaminación por mercurio	Deforestación, minería y contaminación por desechos domésticos, industriales y basuras (Gutiérrez-Bonilla y Álvarez-León, 2011). Pérdida de hábitat

	Caribe	Magdalena-Cauca	Orinoco	Amazonas	Pacífico
Pesca de juveniles que pone en amenaza el recurso	<i>Hoplias malabaricus</i> , <i>Megaleporinus muyscorum</i> y <i>Prochilodus magdalenae</i> (Duarte et al., 2018)	<i>Prochilodus magdalenae</i> , <i>Pseudoplatystoma magdalenaianum</i> y <i>Caquetaia kraussii</i> (Duarte et al., 2018)	<i>Prochilodus mariae</i> (Duarte et al., 2018)	<i>Brachyplatystoma platynemum</i> , <i>Brycon amazonicus</i> y <i>Prochilodus nigricans</i> (Lasso et al., 2011; Duarte et al., 2018)	Los ríos de esta vertiente son poco conocidos, no cuentan con registros de captura de peces dulceacuicolas

Fuente: Modificado de Maldonado et al. (2019).

Se sabe que en la cuenca Magdalena-Cauca no solo existe el mayor número de especies, sino que también concentra la mayor cantidad de especies amenazadas y endémicas (ver Tabla 20).

Tabla 20. Riqueza y número de especies continentales endémicas, amenazadas, comerciales y registradas en las áreas protegidas nacionales, en cada área hidrográfica del país

Área hidrográfica	Riqueza de especies	No. de especies endémicas	No. de especies amenazadas	No. de especies comerciales	No. de especies áreas protegidas
Caribe	223	93	28	53	17
Magdalena-Cauca	231	186	41	46	133
Orinoco	711	68	21	298	345
Amazonas	749	36	19	313	310
Caribe	129	76	7	31	57

Fuente: (Maldonado et al. 2019).

Para los ecosistemas salobres del Caribe colombiano se estima una riqueza del orden de las 1.215 especies de peces, que habitan ambientes costeros

y oceánicos. El Caribe continental cuenta con una influencia pesquera artesanal aproximada de 130 puntos y una industrial. La flota atunera, la de

pesca blanca y la de fauna acompañante por la pesca de camarón de aguas someras afectan el recurso. La mayor parte de la pesca artesanal se concentra en la costa, hasta unos nueve kilómetros mar afuera, y la industrial, de ese límite en adelante (Polanco y Acero, 2019). Para la costa pacífica se tiene una lista preliminar de 867 especies confirmadas mediante registros verificables. De ellas, hay 48 especies piscícolas reportadas y categorizadas en el Libro Rojo de Peces Marinos de Colombia (Chasqui *et al.*, 2017), repartidas en cinco de las seis categorías establecidas (2 especies en peligro crítico, 21 vulnerables, 1 en preocupación menor, 13 casi amenazadas y 11 con datos insuficientes) (Beltrán y Tavera, 2019).

Las cuotas de pesca nacional emitidas, desde hace más de 20 años, desde que se creó la Ley 13 de

1990, procuran regular la pesca descontrolada de diversas especies bajo aprovechamiento en el mar Caribe, en el océano Pacífico y las especies de uso ornamental para las cuencas continentales del país. Según el documento técnico de cuotas (Autoridad Nacional de Pesca y Acuicultura [Aunap], 2019) (Tabla 21) los recursos pesqueros colombianos están siendo aprovechados por encima de los Puntos de Referencia Objetivo (PRO) y Puntos de Referencia Límite (PRL). De ahí que se recomienda que la autoridad pesquera tome medidas de ordenación drásticas que permitan que los mismos puedan recuperarse para asegurar su sostenimiento en el tiempo y en el espacio. De modo que, se prenden las alarmas porque los recursos ictiológicos del río Magdalena están en los límites de producción, pues ya han pasado a niveles de agotamiento.

Tabla 21. Porcentaje de presiones sobre el recurso pesquero marino para las dos zonas costeras del país

Presión	Caribe	Pacífico
Pesquería centralizada	Peces (79 %) Crustáceos (14 %)	Peces (99 %)
Artes de pesca artesanal	Redes de enmalle (53 %)	Redes de enmalle (59 %)
Artes de pesca industrial	Redes de arrastre (55,7 %)	Redes de arrastre (63 %)
Peces y crustáceos con mayor presión de pesca artesanal	<i>Prochilodontidae</i> (61 %)	<i>Anadara tuberculosa</i> (12 %)
Peces y crustáceos con mayor presión de pesca industrial	<i>Scombridae</i> (98 %) <i>Penaeidae</i> (97 %)	<i>Thunnus albacares</i> (90 %)

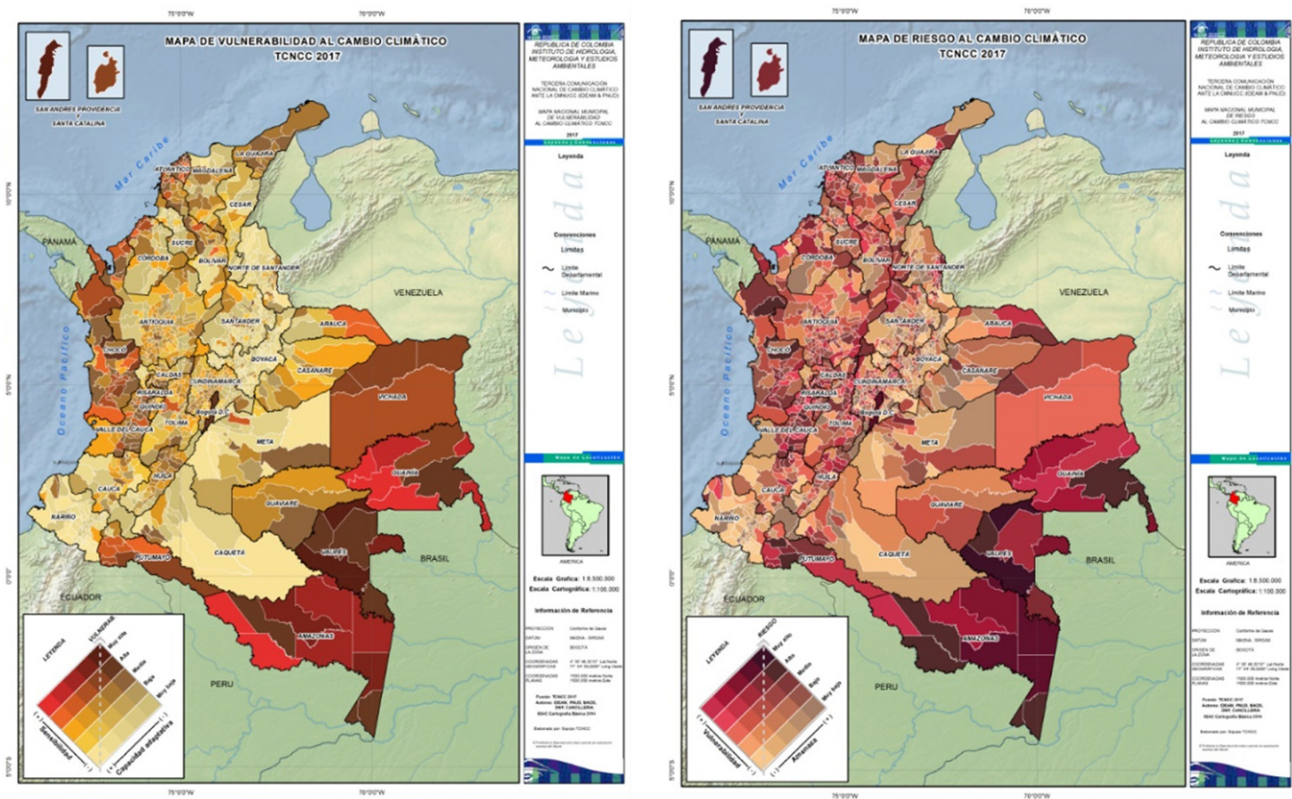
Fuente: Modificado de Aunap (2019).

Cambio climático

El cambio climático representa la presión más significativa para los ecosistemas de Colombia, ya que afecta a todo el territorio nacional. Este fenómeno, influenciado por variaciones en precipitación y temperatura, tiene implicaciones directas sobre los regímenes de caudales, pulsos de inundación, evaporación, evapotranspiración y la temperatura del agua, entre otros factores. Según los escenarios proyectados para los próximos 70 años, se anticipan impactos considerables sobre los ecosistemas acuáticos del país.

La Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático (TCNCC) (Ideam, PNUD, MADS, DNP y Cancillería, 2017c) señala que, para 2040, los mayores incrementos de temperatura se proyectan en las regiones Caribe y Pacífica, donde se localizan ecosistemas acuáticos estratégicos como la Ciénaga Grande de Santa Marta, bosques de manglar y áreas coralinas. En la región Andina, los valles y planicies de inundación de los ríos Magdalena y Cauca podrían sufrir aumentos significativos en la temperatura media anual, afectando bosques, arbustos

Figura 12. Mapas nacionales de vulnerabilidad y riesgo al cambio climático



Nota: Vulnerabilidad al cambio climático: Muy baja, Baja, Media, Alta, Muy alta. Riesgo por cambio climático: Muy bajo, Bajo, Medio, Alto, Muy alto (categorías 2017).

Fuente: Tercera Comunicación Nacional (Ideam, PNUD, MADS, DNP y Cancillería, 2017c).

y herbazales inundables (UPRA y MADR, 2019). En el mismo documento se anota que, la Orinoquía se proyecta como la región con mayores incrementos de temperatura, impactando especialmente los ecosistemas de sabanas y bosques inundables.

En cuanto a la precipitación, los escenarios para 2040 presentan tendencias diferenciadas: un incremento gradual en la región Andina y una disminución progresiva en el Caribe y la Amazonía. Esta última región, con extensos ecosistemas acuáticos como ríos, planicies de inundación y lagos (entre ellos Tarapoto y Yahuaraca) enfrenta riesgos que comprometen su biodiversidad, seguridad alimentaria y valor cultural (Ideam *et al.*, 2017).

La TCNCC evaluó seis ámbitos (seguridad alimentaria, recurso hídrico, biodiversidad, salud, hábitat humano e infraestructura), y encontró que el 15,5 % del territorio nacional presenta vulnerabilidad alta y muy alta al cambio climático, especialmente en la Amazonía y el Pacífico. En términos de riesgo, evaluado mediante la interacción entre amenaza y vulnerabilidad, todo el país muestra algún grado de exposición al cambio climático (ver Figura 12). Se identificaron áreas de alto riesgo en la baja Amazonía, el sur de la Orinoquía y en varias de las principales ciudades capitales de las regiones Andina y Caribe (Ideam, PNUD, MADS, DNP y Cancillería, 2017c).

Presiones puntuales por área hidrográfica

A continuación, se presenta el resumen de las principales presiones identificadas en las diferentes áreas hidrográficas del país, incluyendo en el análisis

del Caribe y Pacífico las áreas marinas, costeras e insulares (ver Figura 13).

Figura 13. Principales presiones identificadas en las áreas hidrográficas del país





Área hidrográfica Pacífico

Demanda hídrica (principalmente para uso agrícola)

Contaminación (macro y microplásticos, minería de carbón y oro de aluvión, residuos sólidos, vertimientos industriales y domésticos)

Cambio de uso del suelo (sector agropecuario)

Tráfico marítimo

Sobreexplotación de la biodiversidad (presión sobre el recurso pesquero)

Cambio climático

Transformación de relación con los ecosistemas acuáticos a causa del turismo

Incremento de los procesos de sedimentación y terrización

Intensificación de la erosión costera

Área hidrográfica Amazonas

Demanda hídrica (principalmente para uso agrícola y energético-regulación de ríos)

Contaminación (vertimientos domésticos y residuos minería ilegal)

Cambio de uso del suelo (sector hidrocarburos)

Deforestación

Sobreexplotación de la biodiversidad (presión sobre el recurso)

Cambio climático

Transformación de relación con los ecosistemas acuáticos a causa del turismo

Incremento de los procesos de sedimentación y terrización



Gambote - Bolivar



Planeación del monitoreo

El monitoreo de ecosistemas acuáticos requiere una planificación estructurada que oriente cada etapa del proceso. El primer paso es definir con precisión el fenómeno que se quiere estudiar, ya que de ello depende la selección adecuada de las variables a analizar. No es viable ni eficiente medir todas las variables posibles; por el contrario, es necesario elegir aquellas que mejor representen los procesos ecológicos clave del ecosistema y que permitan responder con claridad a los objetivos del monitoreo.

Una vez identificado el fenómeno y las variables más relevantes, se deben delimitar el área de in-

terés y establecer la estrategia de recolección de datos. Este enfoque busca que el monitoreo sea eficiente, dirigido y compatible con las condiciones del ecosistema, evitando la recopilación excesiva de datos que no aporten valor a la interpretación de los resultados. Adicionalmente, la zonificación facilita la organización y planificación del análisis, permitiendo optimizar y/o enfocar los costos de monitoreo, al dividir el área en unidades con características comunes, lo que permite una evaluación detallada y precisa de los patrones y tendencias observados.

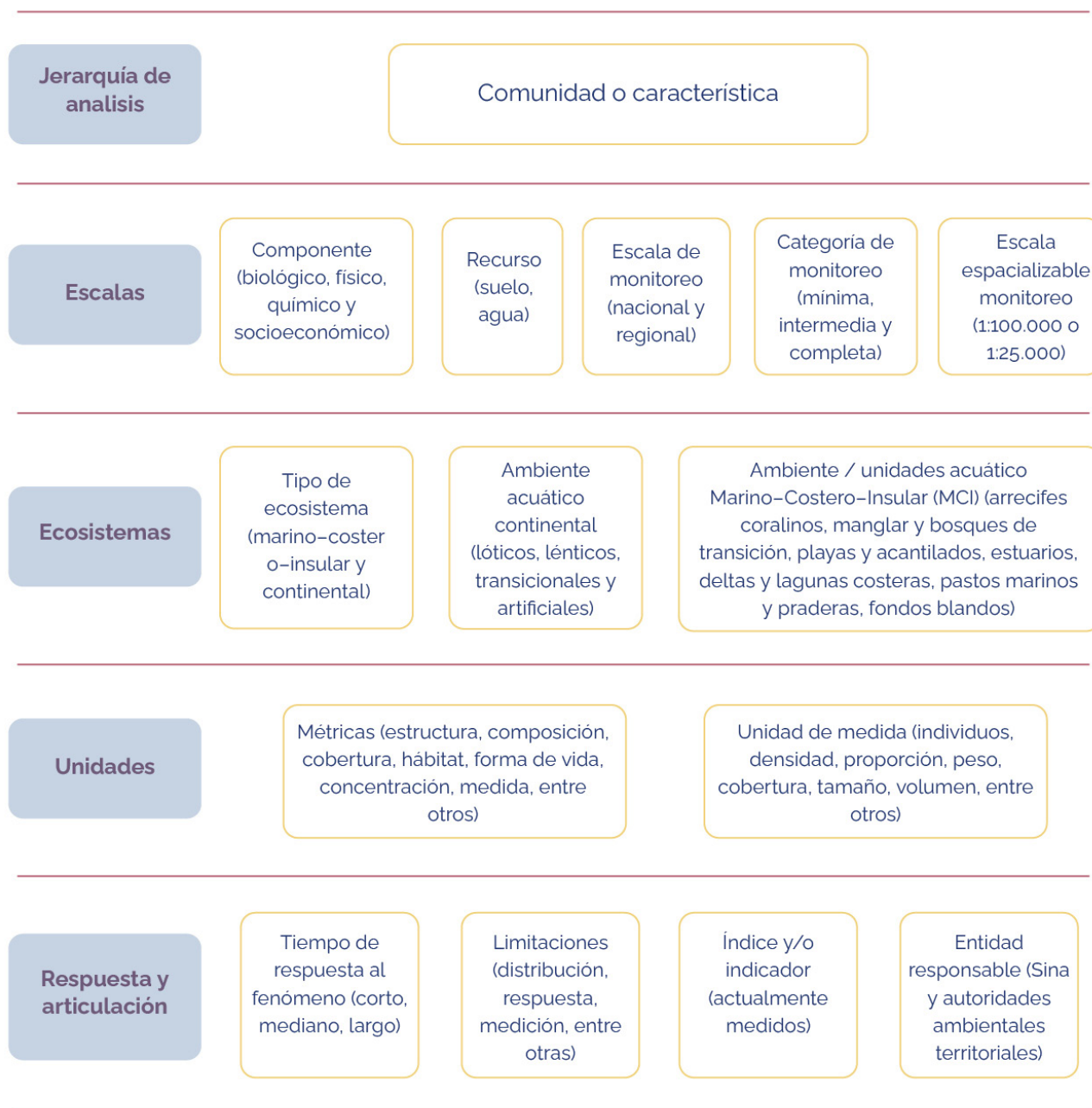
Definición de variables a monitorear

La selección de comunidades, características, variables y atributos para el monitoreo de los ecosistemas acuáticos del país se basa en la identificación de los factores y procesos que determinan su dinámica y estado de conservación. Este proceso permite evaluar, de manera integral, las condiciones de estos ambientes a diferentes escalas temporales (corto, mediano y largo plazo).

La Figura 14 presenta un esquema metodológico para la selección de variables, estructurado en distintos niveles de análisis. En primer lugar, se establecen las escalas de evaluación, que incluyen desde el nivel local hasta el regional y nacional, considerando aspectos como el tipo de recurso (suelo o agua) y la categoría del monitoreo. Posteriormente, se define el tipo de ecosistema, diferenciando entre sistemas marino-costeros-insulares y ambientes acuáticos continentales, los cuales pueden ser lóticos (ríos y arroyos), lénticos (lagos y humedales), transicionales o artificiales.

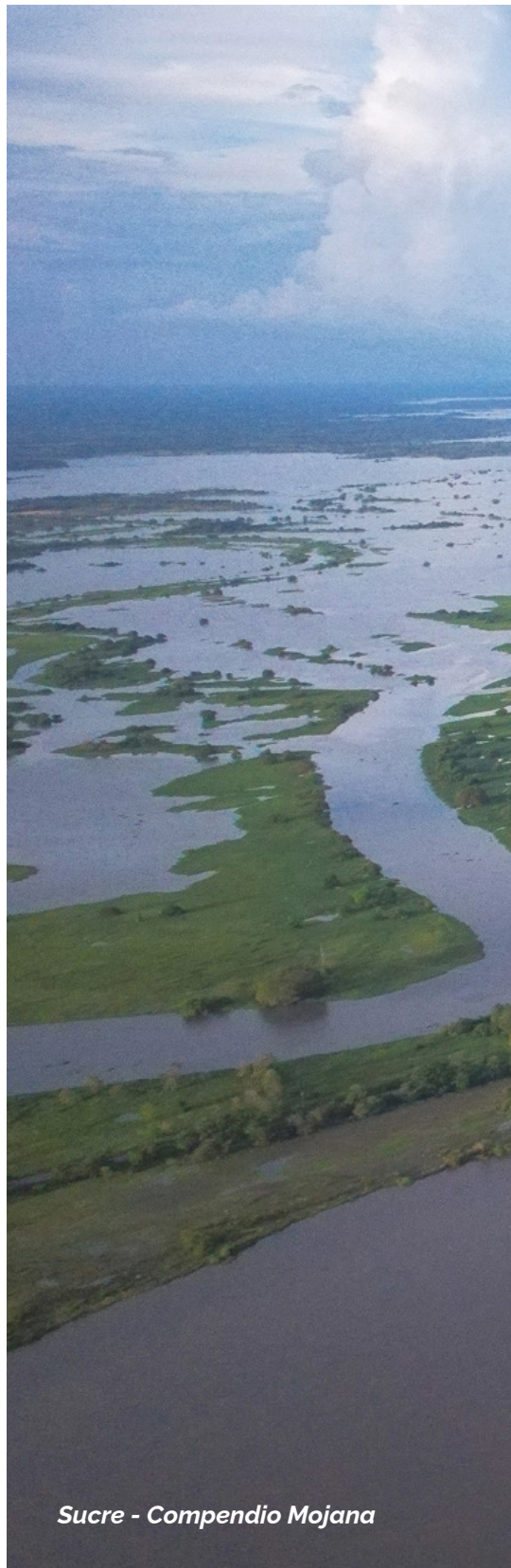
En cuanto a las unidades de análisis, se identifican métricas relacionadas con la estructura, composición, cobertura, hábitat y formas de vida, así como unidades de medida específicas, como densidad, proporción, biomasa y volumen. Estos parámetros permiten caracterizar los ecosistemas y entender los cambios que ocurren en respuesta a factores ambientales y presiones antropogénicas. Por último, se destaca la importancia de la respuesta y articulación del monitoreo, considerando los tiempos de reacción ante los fenómenos analizados (corto, mediano o largo plazo), la existencia de índices o indicadores previamente medidos y las limitaciones en la recopilación de datos, distribución de la información y metodologías empleadas. Además, se resalta el papel de las entidades responsables, como el SINA y las autoridades ambientales territoriales, en la implementación y supervisión del monitoreo.

Figura 14. Proceso jerárquico para la estructuración de la matriz de variables mínimas, intermedias y complementarias de relevancia para el monitoreo integral de los ecosistemas acuáticos



Como resultado del proceso de construcción interdisciplinar, se elaboró una matriz de variables y atributos para el monitoreo de ecosistemas acuáticos en el país. Esta matriz se desarrolló considerando distintos enfoques (físico - químico, hidrológico, biológico y socioeconómico) y fue enriquecida con

los aportes que resultaron del Taller Internacional sobre Experiencias en Monitoreo y Seguimiento de Ecosistemas Acuáticos. La matriz, también, cuenta con variables específicas, para cada componente del ecosistema.



Sucre - Compendio Mojana

Variables físicas

La Tabla 22 recoge las principales variables físicas utilizadas en el monitoreo de ecosistemas acuáticos, clasificadas según el tipo de ecosistema (marino, costero e insular o continental), el ambiente en el que se encuentran (lótico, léntico, transicional o artificial) y los atributos específicos que se monitorean. Estas incluyen parámetros como altitud, radiación solar, características morfogénicas, caudal, cambios en la línea de costa, textura del suelo, humedad, infiltración, temperatura, turbidez, entre otros. Las variables físicas permiten analizar la estructura y funcionamiento de los ecosistemas.

Variables químicas

La Tabla 23 presenta las variables químicas clave en el monitoreo, abarcando la calidad del agua y el suelo. Se incluyen indicadores como oxígeno disuelto, salinidad, conductividad eléctrica, pH, carbono orgánico, concentraciones de metales pesados (mercurio, plomo, arsénico, cromo, cadmio, entre otros), presencia de contaminantes emergentes (plaguicidas, productos farmacéuticos, hidrocarburos), y elementos esenciales como nitrógeno total, fósforo y silice. Estos indicadores ayudan a detectar fuentes de contaminación y evaluar el impacto de actividades humanas sobre los ecosistemas.

Variables biológicas

En la Tabla 24 se detallan los atributos biológicos evaluados en los ecosistemas acuáticos. Estos incluyen la composición y abundancia de diferentes grupos como fitoplancton, zooplancton, macroinvertebrados bentónicos, anfibios, peces, mamíferos acuáticos, aves, reptiles y vegetación ribereña. También se consideran aspectos como la bioacumulación de contaminantes en tejidos, la biodiversidad del suelo, y parámetros relacionados con la producción primaria y productividad biológica. Estos datos permiten identificar alteraciones ecológicas y medir el estado de conservación del ecosistema.

Tabla 22. Variables y/o atributos físicos identificados para el monitoreo integral de los ecosistemas acuáticos del país

Variable / Característica	Tipo de ecosistema (Marino, costero e insular y continental)	Ambiente acuático continental (Lótico, léntico, transicional, artificial)	Ambiente o unidades acuático MCI (arrecifes coralinos, manglar y bosques de transición, playas y acantilados, estuarios, deltas y lagunas costeras, pastos marinos y praderas de fanerógamas, fondos blandos sedimentarios)	Atributos de monitoreo
Altitud	Continental	Todos los ambientes	---	Altitud
Radiación solar	Marino, costero, insular y continental	---	---	kW / m2
Ambiente morfogenético	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Todos los ambientes	Tipo de ambiente morfogenético
Ancho del cauce húmedo	Continental	Lótico	---	Ancho del cauce húmedo
Área superficial	Continental	Léntico, transicional y artificial	---	Área superficial
Cambios en la línea de costa	Marino, costero e insular	---	Playas, acantilados y otros ambientes litorales	Áreas perdidas y ganadas por cambios en la línea de costa
Cambios en la estructura del suelo	Continental	Transicional	---	% agregados
Cambio en el espesor del suelo	Continental	Transicional	---	Profundidad (cm)
Caudal	Continental	Lótico	---	Caudal (volumen/ unidad de tiempo)
Caudales líquidos y sólidos de entrada	Continental	Léntico y artificial	---	Caudal (volumen/ unidad de tiempo)
Composición del lecho	Continental	Lótico, léntico y transicional	---	Tipo de cobertura del lecho Tipos granulométricos

Variable / Característica	Tipo de ecosistema (Marino, costero e insular y continental)	Ambiente acuático continental (Lótico, léntico, transicional, artificial)	Ambiente o unidades acuático MCI (arrecifes coralinos, manglar y bosques de transición, playas y acantilados, estuarios, deltas y lagunas costeras, pastos marinos y praderas de fanerógamas, fondos blandos sedimentarios)	Atributos de monitoreo
Coberturas de la tierra relacionadas con ecosistemas acuáticos	Continental	Todos los ambientes	Todos los ambientes	Cambio de superficie glaciar/ tasa anual de cambio de la superficie cubierta por diferentes coberturas
Color aparente	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Estuarios, deltas y lagunas costeras	
Color del suelo (matriz y moteados)	Continental	Transicional	---	Tono, luminosidad y saturación (<i>hue, value, chroma</i>)
Compactación del suelo	Continental	Transicional	---	Profundidad, densidad aparente, densidad real
Consistencia del suelo	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Manglares y otros ecosistemas transicionales costeros	Límites de Atterberg
Densidad aparente del suelo	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Manglares y otros ecosistemas transicionales costeros	Relación
Drenaje natural	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Lagunas costeras	Tipo de drenaje
Erosión de suelos	Continental	Transicional	---	Tipo, grado y clase

Variable / Característica	Tipo de ecosistema (Marino, costero e insular y continental)	Ambiente acuático continental (Lótico, léntico, transicional, artificial)	Ambiente o unidades acuático MCI (arrecifes coralinos, manglar y bosques de transición, playas y acantilados, estuarios, deltas y lagunas costeras, pastos marinos y praderas de fanerógamas, fondos blandos sedimentarios)	Atributos de monitoreo
Erosión costera	Marino, costero, insular	Todos los ambientes	Manglares y otros ecosistemas transicionales costeros	mm por unidad de tiempo
Fondos blandos	Marino, costero, insular	---	Fondos blandos o sedimentarios	Tipos granulométricos Tipo de cobertura
Humedad del suelo	Continental	Transicional		% de humedad
Horizonte superficial del suelo	Continental	Transicional	---	Tipo epipedón, espesor, textura, color
Infiltración del suelo	Continental	Transicional	---	Velocidad de infiltración
Mareas	Marino, costero e insular	---	Playas, acantilados y otros ambientes litorales	Régimen de mareas
Nivel del agua	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Estuarios, deltas y lagunas costeras	Nivel
Nivel freático	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Manglares y otros ecosistemas transicionales costeros	Profundidad
Oleaje	Marino, costero e insular	---	Playas, acantilados y otros ambientes litorales	Oleaje

Variable / Característica	Tipo de ecosistema (Marino, costero e insular y continental)	Ambiente acuático continental (Lótico, léntico, transicional, artificial)	Ambiente o unidades acuático MCI (arrecifes coralinos, manglar y bosques de transición, playas y acantilados, estuarios, deltas y lagunas costeras, pastos marinos y praderas de fanerógamas, fondos blandos sedimentarios)	Atributos de monitoreo
Pendiente	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Estuarios, deltas y lagunas costeras	Inclinación (%) E 1 : 100.000 (MEC / IGAC) E 1 : 25.000 (Modelo de Elevación Digital - DEM)
Permeabilidad del suelo	Continental	Transicional	---	Conductividad hidráulica
Precipitación	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Todos los ambientes	Volumen / tiempo; régimen de precipitación
Profundidad	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Estuarios, deltas y lagunas costeras	Profundidad
Radiación solar	Marino, costero, insular y continental	---	---	kW / m ²
Sólidos disueltos totales	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Estuarios, deltas y lagunas costeras	Concentración
Sólidos orgánicos e inorgánicos totales	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Estuarios, deltas y lagunas costeras	Concentración
Sólidos suspendidos totales (sedimentos en suspensión)	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Estuarios, deltas y lagunas costeras	Concentración

Variable / Característica	Tipo de ecosistema (Marino, costero e insular y continental)	Ambiente acuático continental (Lótico, léntico, transicional, artificial)	Ambiente o unidades acuático MCI (arrecifes coralinos, manglar y bosques de transición, playas y acantilados, estuarios, deltas y lagunas costeras, pastos marinos y praderas de fanerógamas, fondos blandos sedimentarios)	Atributos de monitoreo
Sólidos volátiles totales	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Estuarios, deltas y lagunas costeras	Concentración
Temperatura ambiente	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Todos los ambientes	Régimen de temperatura
Temperatura del agua	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Todos los ambientes	Temperatura
Temperatura del suelo	Continental	Léntico y transicional	---	Temperatura
Tiempo de residencia hidráulico	Continental	Léntico, artificial	---	Volumen de un depósito de agua / caudal o flujo de entrada
Transparencia	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Todos los ambientes	Transparencia
Turbidez	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Todos los ambientes	Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU)
Unidad cartográfica de suelos	Continental	---	---	Tipo de unidad cartográfica
Unidad geomorfológica	Marino, costero, insular y continental	---	---	Tipo de unidad geomorfológica
Tipo de suelo Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)	Continental	Transicional	---	Porcentaje por unidad de suelo

Tabla 23. Variables y/o atributos químicos identificados para el monitoreo integral de los ecosistemas acuáticos del país

Variable / Característica	Tipo de ecosistema (Marino, costero e insular y continental)	Ambiente acuático continental (Lótico, léntico, transicional, artificial)	Ambiente o unidades acuático MCI (arrecifes coralinos, manglares y bosques de transición, playas y acantilados, estuarios, deltas y lagunas costeras, pastos marinos y praderas de fanerógamas, fondos blandos sedimentarios)	Atributos de monitoreo
Oxígeno disuelto y / o % de saturación	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Todos los ambientes	Concentración
Salinidad	Marino, costero e insular	---	Todos los ambientes	
Salinización del suelo	Continental	Transicional	---	Origen Conductividad eléctrica, pH, Na, K, Mg, = CO ₃ , = SO ₄ , - NO ₃ , Nivel o rango
Fertilidad del suelo	Continental	Transicional	---	Capacidad de intercambio catiónico, pH, Bases (Bases totales y Saturación de bases), S Al, MO, P, K, NaI y Conductividad eléctrica
Conductividad eléctrica	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Todos los ambientes	
pH	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Todos los ambientes	Valor de pH

Variable / Característica	Tipo de ecosistema (Marino, costero e insular y continental)	Ambiente acuático continental (Lótico, léntico, transicional, artificial)	Ambiente o unidades acuático MCI (arrecifes coralinos, manglares y bosques de transición, playas y acantilados, estuarios, deltas y lagunas costeras, pastos marinos y praderas de fanerógamas, fondos blandos sedimentarios)	Atributos de monitoreo
Carbono orgánico en suelo	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Manglar y bosques de transición	Espesor, Densidad aparente, % C, % Fr, % Fp
Dióxido de carbono	Marino, costero, insular y continental	Léntico, transicional y artificial	Manglar y bosques de transición	Flujos de CO ₂ en humedales
Metano	Marino, costero, insular y continental	Léntico, transicional y artificial	Manglar y bosques de transición	Flujos de metano en humedales y embalses
Óxido Nitroso	Marino, costero, insular y continental	Léntico, transicional y artificial	Manglar y bosques de transición	Flujos de óxido nitroso en humedales
Nitrógeno total	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Todos los ambientes	Concentración
Amonio	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Todos los ambientes	
Nitrito	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Todos los ambientes	
Nitrato	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Todos los ambientes	
Ortofosfato	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Todos los ambientes	

Variable / Característica	Tipo de ecosistema (Marino, costero e insular y continental)	Ambiente acuático continental (Lótico, léntico, transicional, artificial)	Ambiente o unidades acuático MCI (arrecifes coralinos, manglares y bosques de transición, playas y acantilados, estuarios, deltas y lagunas costeras, pastos marinos y praderas de fanerógamas, fondos blandos sedimentarios)	Atributos de monitoreo
Fósforo disponible	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Todos los ambientes	Concentración
Fósforo total	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Todos los ambientes	
Capacidad de intercambio catiónico	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	---	
Saturación de bases	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	---	
Bases totales	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	---	
Materia orgánica	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Todos los ambientes	
Hierro	Continental	Todos los ambientes	---	
Sílice	Continental	Todos los ambientes	Todos los ambientes	
Calcio	Continental	Lótico, léntico y transicional	Todos los ambientes	
Dureza total	Continental	Todos los ambientes	---	

Variable / Característica	Tipo de ecosistema (Marino, costero e insular y continental)	Ambiente acuático continental (Lótico, léntico, transicional, artificial)	Ambiente o unidades acuático MCI (arrecifes coralinos, manglares y bosques de transición, playas y acantilados, estuarios, deltas y lagunas costeras, pastos marinos y praderas de fanerógamas, fondos blandos sedimentarios)	Atributos de monitoreo
Alcalinidad	Continental	Todos los ambientes	---	Concentración
Coliformes totales	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Manglares y bosques de transición, estuarios, deltas y lagunas costeras	
Coliformes termotolerantes	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Manglares y bosques de transición, estuarios, deltas y lagunas costeras	
Demanda química de oxígeno	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Manglares y bosques de transición, estuarios, deltas y lagunas costeras	
Mercurio (Metales pesados en agua y sedimento)	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Manglares y bosques de transición, estuarios, deltas y lagunas costeras	
Plomo (Metales pesados en agua y sedimento)	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Manglares y bosques de transición, estuarios, deltas y lagunas costeras	
Arsénico (Metales pesados en agua y sedimento)	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Manglares y bosques de transición, estuarios, deltas y lagunas costeras	
Cobre (Metales pesados en agua y sedimento)	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Manglares y bosques de transición, estuarios, deltas y lagunas costeras	

Variable / Característica	Tipo de ecosistema (Marino, costero e insular y continental)	Ambiente acuático continental (Lótico, léntico, transicional, artificial)	Ambiente o unidades acuático MCI (arrecifes coralinos, manglares y bosques de transición, playas y acantilados, estuarios, deltas y lagunas costeras, pastos marinos y praderas de fanerógamas, fondos blandos sedimentarios)	Atributos de monitoreo
Cromo (Metales pesados en agua y sedimento)	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Manglares y bosques de transición, estuarios, deltas y lagunas costeras	Concentración
Cadmio (Metales pesados en agua y sedimento)	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Manglares y bosques de transición, estuarios, deltas y lagunas costeras	
Níquel (Metales pesados en agua y sedimento)	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Manglares y bosques de transición, estuarios, deltas y lagunas costeras	
Zinc (Metales pesados en agua y sedimento)	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Manglares y bosques de transición, estuarios, deltas y lagunas costeras	
Grasas y aceites	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Todos los ambientes	
Hidrocarburos aromáticos disueltos y suspendidos	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Todos los ambientes	
Biocidas	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Manglares y bosques de transición, estuarios, deltas y lagunas costeras	

Variable / Característica	Tipo de ecosistema (Marino, costero e insular y continental)	Ambiente acuático continental (Lótico, léntico, transicional, artificial)	Ambiente o unidades acuático MCI (arrecifes coralinos, manglares y bosques de transición, playas y acantilados, estuarios, deltas y lagunas costeras, pastos marinos y praderas de fanerógamas, fondos blandos sedimentarios)	Atributos de monitoreo
Pesticidas o plaguicidas (contaminantes emergentes)	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Manglares y bosques de transición, estuarios, deltas y lagunas costeras	Concentración
Productos farmacéuticos (contaminantes emergentes)	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Manglares y bosques de transición, estuarios, deltas y lagunas costeras	
Aditivos industriales y subproductos (contaminantes emergentes)	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Manglares y bosques de transición, estuarios, deltas y lagunas costeras	
Contaminantes emergentes complementarios	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Manglares y bosques de transición, estuarios, deltas y lagunas costeras	



Parque Natural Amacayacu - Amazonas

Tabla 24. Variables y/o atributos biológicos identificados para el monitoreo integral de los ecosistemas acuáticos del país

Algas perifíticas	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Arrecifes coralinos, manglares, estuarios, deltas y lagunas costera	Composición Riqueza Abundancia Grupos morfológicos
Algas perifíticas	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Arrecifes coralinos, manglares, estuarios, deltas y lagunas costera	Composición, riqueza, abundancia Grupos morfológicos
Anélidos (Poliquetos, Oligoquetos, Hirudíneos)	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Todos los ambientes	Composición, riqueza y abundancia
Anélidos (<i>Sipunculos</i>)	Marino, costero e insular	---	Fondos blandos o sedimentarios	Composición, riqueza y abundancia
Anfibios	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Lagunas costeras y bosques de transición	Composición, riqueza y abundancia y distribución
Arrecifes (corales)	Marino, costero e insular	---	Arrecifes coralinos	Complejidad topográfica, tamaño (colonia, solitario y maraña), densidad y condición arrecifal, sustrato, biomasa, composición de fauna y flora asociada
Aves	Marino, costero e insular	Todos los ambientes	Manglares y bosques de transición, playas y acantilados, estuarios, deltas y lagunas costeras	Composición, riqueza y abundancia de migraciones

Algas perifíticas	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Arrecifes coralinos, manglares, estuarios, deltas y lagunas costera	Composición Riqueza Abundancia Grupos morfológicos
Bacterias (<i>Escherichia coli</i> y metanogénicas y sulfuro reductoras)	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Todos los ambientes	Composición
Biodiversidad del suelo	Continental	Transicional	---	% Materia seca, microorganismos (No. de poblaciones) Mesoorganismos (No. de poblaciones)
Bioinfestación del suelo	Continental	Transicional	---	Presencia y abundancia de patógenos: poblaciones de <i>Fusarium</i> , Nemátodos
Bioacumulación (tejidos y sedimentos)	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Todos los ambientes	Isótopos/ Concentraciones de letalidad
Clorofila a	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Estuarios, deltas, lagunas costeras y aguas abiertas	Concentración Número de píxeles (Índice de Clorofila (GCI)) - Área (ha)
Crustáceos	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Todos los ambientes	Composición, riqueza y abundancia
Fitoplancton	Marino, costero, insular y continental	Léntico, artificial	Estuarios, deltas y lagunas costeras	Composición, riqueza y abundancia, grupos morfofuncionales de Kruck
Flora acuática	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Manglares, estuarios, deltas, lagunas costeras, pastos marinos y praderas de fanerógamas	Composición, abundancia, hábitos de vida, potencial de invasión

Algas perifíticas	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Arrecifes coralinos, manglares, estuarios, deltas y lagunas costera	Composición Riqueza Abundancia Grupos morfológicos
Flora semiacuática	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Manglares, estuarios, deltas, lagunas costeras, pastos marinos y praderas de fanerógamas	Composición, abundancia, hábitos de vida, potencial de invasión, distribución, densidad
Hongos	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Todos los ambientes	Composición Presencia/cobertura
Ictiofauna	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Todos los ambientes	Composición, riqueza y abundancia, biomasa, medidas morfométricas, hábitos tróficos, especies comerciales, stock, especies introducidas
Ictioplancton	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Todos los ambientes	Riqueza, abundancia
Macroalgas	Marino, costero e insular	---	Todos los ambientes	Composición, riqueza y abundancia, biomasa
Macroinvertebrados bentónicos	Marino, costero, insular y continental	Léntico y transicional	Mangales, estuarios, deltas, lagunas costeras y fondos blandos	Composición, riqueza y abundancia, hábitos tróficos, biomasa
Macroinvertebrados pleustónicos	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Estuarios, deltas, lagunas costeras	Composición, riqueza y abundancia, hábitos tróficos, biomasa

Algas perifíticas	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Arrecifes coralinos, manglares, estuarios, deltas y lagunas costera	Composición Riqueza Abundancia Grupos morfológicos
Manglares	Marino, costero e insular	---	Manglar	Abundancia, dominancia, densidad Parte sumergida y emergida, área basal, altura promedio del bosque, reclutamiento, productividad
Mamíferos acuáticos	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Todos los ambientes	Composición, riqueza y abundancia
Moluscos (gasterópodos y bivalvos)	Marino, costero e insular	Lótico, léntico y transicional	Arrecifes, manglares, estuarios, deltas, lagunas costeras	Composición, riqueza y abundancia
Nemátodos	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Manglares, estuarios, deltas, lagunas costeras	Composición, riqueza y abundancia
Pastos marinos	Marino, costero e insular	---	Pastos marinos y praderas de fanerógamas	Densidad de vástagos, abundancia, composición, extensión, fauna asociada
Producción primaria - productividad biológica	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Manglares, estuarios, deltas y lagunas costeras	Energía acumulada (calorías / ml / día o en calorías / ml / hora)
Reptiles	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Todos los ambientes	Composición, riqueza y abundancia, anidación

Algas perifíticas	Marino, costero, insular y continental	Lótico, léntico y transicional	Arrecifes coralinos, manglares, estuarios, deltas y lagunas costera	Composición Riqueza Abundancia Grupos morfológicos
Vegetación de ribera	Marino, costero, insular y continental	Todos los ambientes	Manglares y bosque de transición	Composición, abundancia, coberturas de la tierra – Clase 3: Bosques y áreas seminaturales
Zooplankton	Marino, costero, insular y continental	Léntico, artificial	Estuarios, deltas y lagunas costeras	Composición, riqueza, densidad, grupos funcionales, hábitos tróficos

Zonificación

La zonificación es un proceso de planificación territorial que consiste en dividir un área en secciones homogéneas basadas en características físicas, biológicas, sociales y espaciales. Al dividir un área en zonas con características similares, se optimiza la asignación de recursos y se establecen estrategias diferenciadas según las necesidades de cada unidad. Para el Promsea, la zonificación no solo delimita las superficies de agua, sino que integra información clave sobre factores físicos, hidrológicos, hidrobiológicos y socioeconómicos. Este enfoque permite analizar la interacción entre los ecosistemas acuáticos y su entorno, identificar áreas prioritarias para la conservación y evaluar el impacto de presiones externas como el cambio de uso del suelo, la contaminación o la actividad humana.

El diseño metodológico para la zonificación se basa en la revisión y análisis de datos geográficos y variables espaciales. Este proceso utiliza herramientas del Sistema de Información Geográfica (SIG) y datos base para delimitar las superficies de

agua: además, incorpora variables temáticas relacionadas con los componentes físico, hidrológico, hidrobiológico y socioeconómico.

En este contexto, la zonificación propuesta divide el territorio nacional en sectores homogéneos, considerando características como coberturas terrestres, condiciones geomorfológicas, inclinación del terreno y áreas de influencia. Los SIG permiten integrar y superponer esta información, generando diagnósticos detallados sobre los recursos biológicos y su interacción con el entorno. El uso de metodologías como el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) permite priorizar criterios, optimiza el análisis espacial y la toma de decisiones. De esta manera, se establece una línea base nacional, así como las unidades mínimas de monitoreo para evaluar la evolución de los ecosistemas acuáticos en el tiempo. De acuerdo con lo anterior, la metodología planteada para la zonificación temática de los ecosistemas acuáticos consta de diferentes fases de trabajo (ver Figura 15), que se describen a continuación.

Figura 15. Fases metodológicas de la evaluación multicriterio mediante el PAJ



■ Fase 1 – Recopilación de la información geográfica

Los pasos a seguir en la metodología para la zonificación de ecosistemas acuáticos inician con una revisión detallada de la información geográfica de las variables espacializables, las cuales son establecidas como criterios fundamentales. Este proceso incluye los siguientes aspectos:

- Verificación del formato de los datos: se identifica si la información geográfica está en formato vectorial o ráster, asegurando su compatibilidad con las herramientas de análisis utilizadas.
- Evaluación de la calidad de la información geográfica: se revisan aspectos como la escala cartográfica, la resolución espacial y otros factores técnicos necesarios para garantizar resultados precisos y confiables en la zonificación.

- Definición de la información temática geográfica: se identifica el tipo de datos temáticos necesarios para la selección de criterios y factores que serán utilizados en el análisis, ajustándose a las características específicas del territorio.

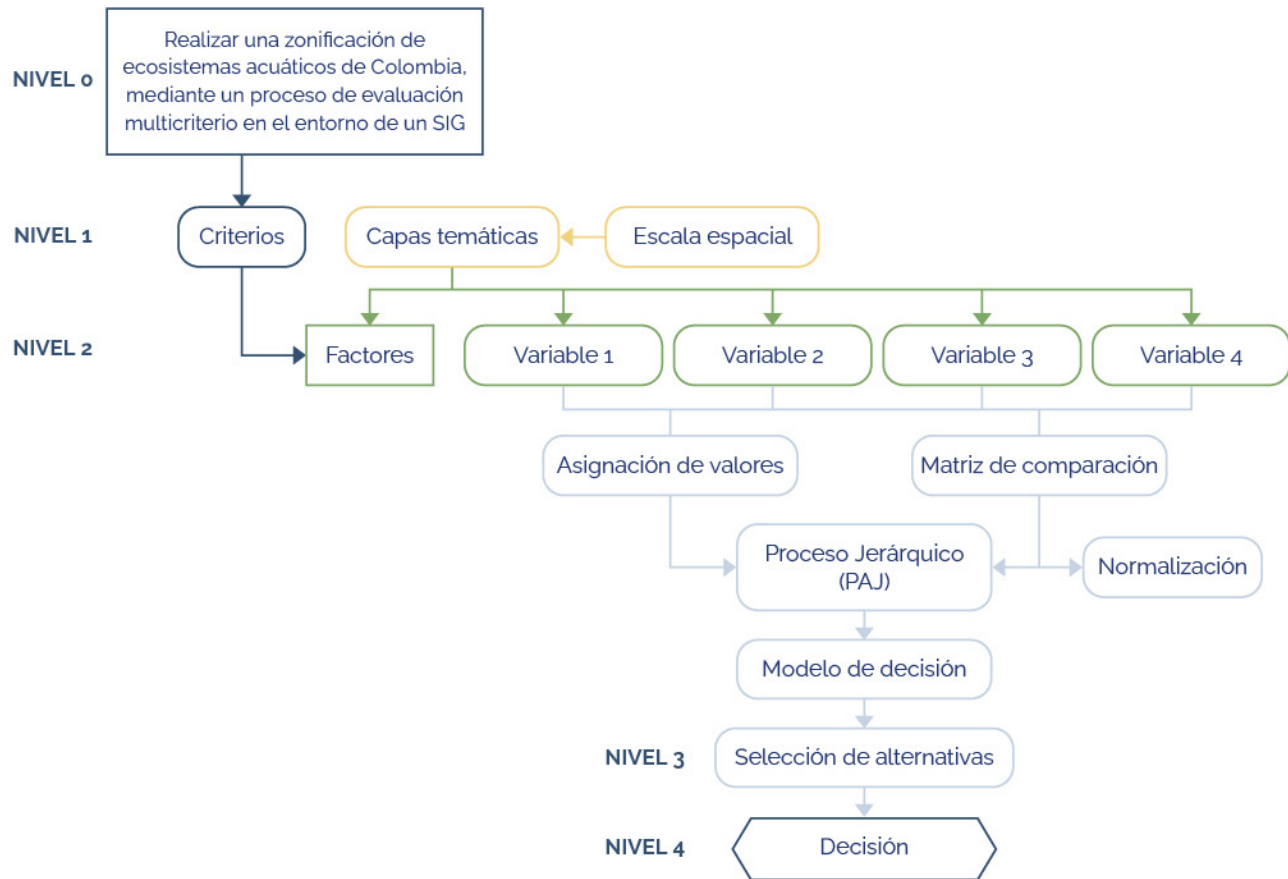
Es importante considerar que esta información puede estar disponible en diferentes escalas cartográficas, según los insumos generados por entidades responsables de producir y actualizar los datos geográficos de base y los temáticos. Por lo tanto, el éxito del proceso de zonificación depende directamente de la calidad, disponibilidad y actualización de las capas geográficas a ser empleadas como variables en el análisis.

■ Fase 2 – Evaluación Multicriterio (EMC), creación de matriz de comparación de criterios y la normalización

Para iniciar con la Evaluación Multicriterio (EMC), en el proceso de zonificación de ecosistemas acuáticos, se establece un modelo jerárquico estructurado en cinco niveles, como se muestra en la Figura

16. Este modelo organiza los elementos necesarios para alcanzar el objetivo general de la investigación y permite tomar decisiones basadas en un análisis estructurado y transparente.

Figura 16. Modelo jerárquico diseñado para la zonificación de ecosistemas acuáticos



En el nivel 0 se define el objetivo principal: realizar una zonificación de ecosistemas acuáticos de Colombia, mediante un EMC en el entorno de un SIG. A partir de este objetivo, en el nivel 1, se identifican los criterios, que son los puntos de referencia para la toma de decisiones. Estos criterios no incluyen restricciones y, en este caso, se definen como factores, ya que permiten identificar las áreas con presencia de ecosistemas acuáticos y su potencial para el monitoreo.

El nivel 2 corresponde a los factores, que representan las variables incluidas en cada criterio del nivel anterior. Estas variables reflejan las capacida-

des del territorio para la formación de ecosistemas acuáticos y se valoran en una escala jerárquica. En el nivel 2 se construye la matriz de comparación de criterios, se calculan los auto vectores y pesos necesarios para la normalización, y se evalúa la consistencia de la matriz mediante el Índice de Consistencia (IC) y el Índice de Consistencia Aleatorio (ICA).

En el nivel 3 se identifican las alternativas: es decir, las opciones factibles que responden al objetivo de la zonificación. Estas alternativas son evaluadas mediante el PAJ, utilizando juicios de valor para comparar criterios y alternativas, que son prioriza-

das desde la menos adecuada hasta la más indicada. Por último en el nivel 4 se toma la decisión final. Este paso analiza las matrices y superpone las capas geográficas ponderadas, generando el resultado de la zonificación. Las decisiones se fun-

damentan en investigaciones científicas y características específicas del área de estudio, y el proceso completo es documentado como parte del reporte final de la metodología diseñada e implementada.

Preparación de la fase 3: insumos y variables para la superposición ponderada de criterios

Definición de factores para la zonificación de ecosistemas acuáticos

De acuerdo con los niveles jerárquicos establecidos, las variables priorizadas para el proceso de zonificación de los ecosistemas acuáticos corresponden a factores de aptitud (ver Tabla 25). Estos factores reflejan la vocación principal del territorio

en función de los requerimientos específicos definidos para cada variable evaluada, asegurando que la zonificación se alinee con las características y potencialidades del área de estudio (Ideam, 2011a).

Tabla 25. Variables definidas como criterios para la zonificación de los ecosistemas acuáticos

Componente	Variable
Geomorfología	Tipo de relieve
Suelos	Tipo Suelo IPCC modificado
Vegetación	Cobertura terrestre
Relieve	Pendiente
Clima (Lénticos y transicionales)	Piso térmico y provincia de humedad

Las variables geográficas utilizadas como datos de entrada se detallan en la Tabla 26, junto con sus respectivas fuentes de información, que incluyen la entidad generadora de los datos y su fecha de producción. Estas variables son fundamentales

dentro de la metodología, ya que su importancia radica en su capacidad para delimitar los ecosistemas acuáticos, por lo que no pueden ser omitidas en el proceso de zonificación.

Tabla 26. Variables incluidas en la primera propuesta de zonificación de ecosistemas acuáticos

Insumo	Componente	Variable	Fuente	Descripción
Capa vectorial de suelos (geopedología o mapa de correlación de suelos)	Geomorfológico	Tipo de relieve	(lgac, 2014) (1 : 100.000)	Unidades geomorfológicas utilizadas para definir Unidades Cartográficas de Suelo (UCS)
	Edafológico	UCS	(lgac, 2017) (1 : 100.000)	Contiene UCS, con contenido pedológico (taxonomía de suelos y porcentaje por UCS)
		Tipo Suelo IPCC		Se homologa la taxonomía de suelos a la propuesta de tipos de suelos IPCC, manteniendo % por UCS
Capa vectorial coberturas de la tierra	Biótico	Cobertura terrestre	(Ideam, 2018a) (1 : 100.000)	Presenta los cinco grupos principales de coberturas terrestres, según la leyenda Corine Land Cover adaptada para el país. Dentro de estas las clases que presentan coberturas relacionadas con los ecosistemas acuáticos son: clase 3 (bosques y áreas seminaturales), clase 4 (áreas húmedas) y clase 5 (superficies de agua)

Insumo	Componente	Variable	Fuente	Descripción
Modelo Digital de Elevación	Físico	Pendiente	Administración Nacional de Aeronáutica del Espacio (Nasa, por su sigla en inglés), Servicio Geológico de los Estados (USGS, por su sigla en inglés) y Agencia Espacial Europea (ESA, por su sigla en inglés), 2013	Permite calcular la elevación y ajustar límites de las unidades
Clima	Físico	Zonas climáticas	(Ideam, 2014)	Unidades climáticas definidas por el Ideam relacionadas en el MEC para los ecosistemas lénticos y transicionales

Una vez identificadas las fuentes de información, se seleccionan las capas geográficas a utilizar, en el proceso de zonificación, teniendo en cuenta la escala espacial requerida. La escala espacial es el nivel de detalle con el que se analiza un objeto en un mapa, específicamente se trata de la relación entre la unidad de medida en el mapa y la superficie terrestre. Esta escala puede ser de mayor detalle (1 : 5.000 - 1:50.000) o menor detalle (1 : 100.000 - 1 : 1.000.000).

En este contexto, la elección de los insumos necesarios varía según la escala. Las capas listadas en la Tabla 26 cumplen con los criterios técnicos para trabajar a escalas nacionales y regionales, como las áreas y zonas hidrográficas delimitadas por el

Ideam (2013a). Sin embargo, para escalas locales, como ventanas piloto o subzonas hidrográficas, es imprescindible utilizar insumos de mayor detalle, que deben ser levantados a escalas cartográficas de 1 : 25.000 o menores.

Por esta razón es fundamental establecer una relación clara entre la escala cartográfica y los insumos disponibles, lo que garantiza que las representaciones cartográficas reflejen el nivel de detalle necesario para la zonificación de los ecosistemas acuáticos. En la Tabla 27 se presentan las categorías de escalas definidas por el Igac (2020), las cuales sirven como referencia para ajustar la metodología según los requerimientos de cada escala de trabajo.

Tabla 27. Categorías de escalas y nivel de detalle cartográfico

Categoría	Detalle cartográfico
Escala pequeña	Mayor a 1 : 100.000
Escala mediana	1 : 5.000 hasta 1 : 100.000
Escala grande	Menor a 1 : 5000

En la siguiente subsección se hace una descripción de las variables seleccionadas para la construcción del modelo jerárquico.

Tipo de relieve

Los ecosistemas acuáticos se forman como resultado de procesos geomorfológicos determinados por fuerzas de desplazamiento y agentes móviles, como el agua de escorrentía, los glaciares, las corrientes de deriva litoral y las corrientes de marea. Estos agentes actúan nivelando la superficie terrestre mediante la deposición de materiales sólidos y, de esta manera, se da origen a las condiciones geomorfológicas que permiten la formación de estos ecosistemas.

Dentro de la zonificación geomorfológica, se definió como criterio principal el tipo de relieve, que para los ecosistemas acuáticos se asocia a paisajes de planicies y valles, donde los suelos se originan a partir de sedimentos. Este criterio, aplicado a una escala 1 : 100.000, se basa en la clasifi-

ción incluida en la capa de geopedología del Igac (2014). Si se dispone de una versión actualizada, como el Mapa de Correlación de Suelos, se recomienda incorporar esta nueva información para mejorar la zonificación. En escalas más detalladas, como 1 : 25.000, se propone incluirla como una nueva variable. Debe anotarse que el Igac la ha desarrollado, parcialmente, para algunas regiones del país.

En la Tabla 28 se describen tres ejemplos de ecosistemas acuáticos relacionados, con diferentes categorías de detalle y tipos de relieve, de acuerdo con la clasificación de Alfred Zinck (2012), y se muestran cómo estas variables geomorfológicas se integran en el análisis para cada caso.

Tabla 28. Ejemplos de geoformas de ecosistemas acuáticos, según nivel de detalle

Categoría	Ej. 1	Ej. 2	Ej. 3	Escala
Paisaje geomorfológico	Planicie	Planicie	Valle	1 : 500.000

Categoría	Ej. 1	Ej. 2	Ej. 3	Escala
Tipo de relieve	Plano de inundación	Terraza nivel superior medio	Plano de inundación	1 : 100.000
Forma del terreno	Cubeta de decantación	Bajo	Cubeta de desborde	1 : 25.000

Nota: Ejemplo (Ej.).

Fuente: Basada en la clasificación de Alfred Zinck (2012).

Unidades y tipo de suelo

Las UCS son unidades compuestas por diferentes tipos de suelos que se clasifican en asociaciones, consociaciones, complejos y grupos indiferenciados. A escala 1 : 100.000. La mayoría de las UCS abarcan más de dos tipos de suelos, lo que las convierte en unidades mixtas, especialmente al realizar homologaciones que revelan la diversidad de tipos de suelo en cada unidad. Para estimar, adecuadamente, el contenido de suelos por unidad cartográfica, es fundamental mantener los porcentajes de cada tipo de suelo registrados en la base de datos.

Si bien la clasificación del IPCC se centra en términos de carbono orgánico en los suelos y su relación con procesos de emisión o secuestro de carbono, este carbono orgánico está vinculado con otras características y propiedades del suelo. Estas relaciones no solo determinan la calidad del suelo, sino que también conectan el carbono orgánico con factores como el cambio climático, la biodiversidad, la resiliencia y la capacidad del suelo para resistir o adaptarse a cambios o perturbaciones (ampliar en Tabla 29).

Tabla 29. Relaciones entre el Tipo de suelo IPCC y los fenómenos de transformación

Tipo de suelo IPCCm	Cambio Climático	Carga contaminante	Fragmentación
Suelos hidromórficos orgánicos (turberas)	Por su alto contenido de carbono son los que potencialmente pierden mayor C	Por sus altas cargas absorben fácilmente sustancias contaminantes	Sensibles a cambios como drenaje: secado y degradación irreversible

Tipo de suelo IPCCm	Cambio Climático	Carga contaminante	Fragmentación
Suelos hidromórficos arenosos	Bajos contenidos de C y baja capacidad de fijación de C	Alta lixiviación y baja capacidad de retención de contaminantes	Tienen coberturas específicas de suelos arenosos. (algunos manglares)
Suelos hidromórficos volcánicos	Formación de complejos órgano - minerales	Arcillas alófanas que fijan sustancias contaminantes	Susceptibles a procesos de remoción o erosión ante cambios de coberturas o manejos inadecuados
Suelos hidromórficos con arcillas de baja actividad	Baja capacidad para fijar el C	Alta lixiviación y lavado	Afinidad por vegetación específica que se adapte a estas condiciones
Suelos hidromórficos de arcillas de alta actividad	Alta capacidad de fijación de C	Por su alta fertilidad, alto impacto en uso de agroquímicos	Generalmente sujetos a prácticas de adecuación de tierras y a usos intensivos
Otros suelos minerales hidromórficos	Fijación intermedia de C	Favorecen la acumulación de cationes (de sustancias químicas) en concentraciones mayores a los suelos LAC, pero menores que los HAC	Diversa

Nota: Carbono (C), Arcillas de Baja Actividad (por su sigla en inglés) (LAC) y Arcillas de Alta Actividad (por su sigla en inglés) (HAC).

Coberturas de la tierra

Una metodología que permite generar mapas de coberturas de la tierra es la Corine Land Cover (CLC), y fue adaptada para Colombia por el Igac y el Ideam. Con esta metodología se clasifican las coberturas de la tierra que están estrechamente relacionados con el clima y los pisos térmicos, por ser los principales factores para definir el tipo de suelo. De ello depende la vegetación y el uso de la tierra. Esto influye en las actividades agrícolas y agropecuarias, así como en la distribución de la población en función del aprovechamiento de los recursos disponibles (Igac, Cormagdalena, Ideam, 2008).

La inclusión de la variable de coberturas terrestres como factor en la metodología es muy importante, ya que esta información permite comprender los patrones de distribución del espacio físico y es una herramienta fundamental para los planes de ordenamiento territorial. Las coberturas terrestres reflejan cambios en la capacidad productiva de la tierra y permiten un manejo ecológico, social y económico del territorio. Su uso inadecuado puede derivar en problemas socioeconómicos y ambientales como: sequías, inundaciones, degradación y deslizamientos de suelos (Prakash, 2003).

La metodología CLC, en Colombia, utiliza imágenes satelitales Landsat a escala 1 : 100.000, con categorías que van del nivel 1 al 5. Para el monitoreo de ecosistemas acuáticos, se propone enfocar el análisis en las categorías 3 (Bosques y áreas seminaturales), 4 (Áreas húmedas) y 5 (Superficies de agua), ya que estas incluyen coberturas vegetales inundables y ecosistemas directamente asociados

a los cuerpos de agua. Aunque aún no se cuenta con la capa actualizada de coberturas terrestres basada en imágenes Landsat 8 del año 2018, se espera incorporar este insumo en futuras etapas del monitoreo y seguimiento del estado de los ecosistemas acuáticos en el país, lo que permitirá realizar nuevas pruebas y optimizar los análisis que se adelanten.

Pendiente

La pendiente mide la inclinación de la superficie del terreno y está directamente relacionada con características como las coberturas terrestres, los suelos y las redes hidrológicas (Igac, 2021). Además, es un criterio determinante para clasificar las

tierras según su capacidad de uso, como lo establece el Igac (2014b). Este gradiente, expresado en porcentaje, refleja la inclinación del suelo respecto a la horizontal y se clasifica de acuerdo con la morfología del terreno (Tabla 30).

Tabla 30. Pendientes establecidas en Colombia

Pendiente	Gradiente (Porcentaje)
Plana	0 – 3
Ligeramente inclinada	3 – 7
Moderadamente inclinada	7 – 12
Fuertemente inclinada	12 – 25
Ligeramente empinada	25 – 50
Moderadamente empinada	50 – 75
Fuertemente empinada	> 75

Fuente: Igac (2021).

En el marco del Promsea se plantea el cálculo de la pendiente, para todo el territorio colombiano, dado su impacto directo en procesos como la escorrentía, el drenaje natural y la infiltración. Estos procesos son importantes para la formación y dinámica

de los ecosistemas acuáticos. Este análisis permitirá comprender mejor cómo estas características del terreno condicionan la presencia y comportamiento de los ecosistemas acuáticos en el país.

El cálculo de la pendiente se realiza utilizando un Modelo Digital de Elevación (MDE), procesado en un software de SIG para obtener los valores expresados en porcentaje, según las indicaciones del Igac. La resolución espacial del MDE debe ser coherente con la escala de trabajo, por eso aquí se propone el uso de MDE gratuitos con una resolución de 30 metros, que se ajuste a la escala 1 : 100.000 y que sea compatible con las imágenes Landsat utilizadas en el monitoreo. Para escalas más detalladas, será necesario recurrir a MDE de mayor resolución espacial, según los requerimientos específicos del análisis.

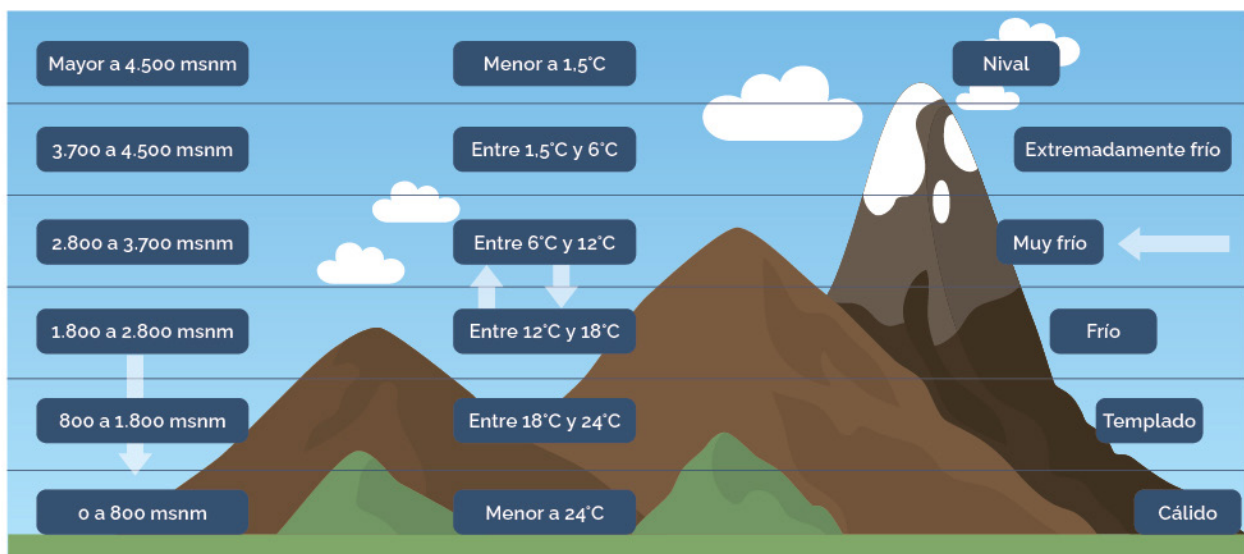
Posteriormente, para referenciar los ecosistemas acuáticos a monitorear, se debe contar con insumos cartográficos base, como las superficies de agua incluidas en la cartografía del Igac a escala 1 : 100.000 o cartografía más detallada generada por las corporaciones autónomas regionales, para escalas regionales o locales. Aunque se propone el uso de estos insumos, la metodología es flexible y puede adaptarse para incorporar otras capas geográficas que representen los ecosistemas acuáticos de acuerdo con las unidades de análisis seleccionadas, garantizando precisión y versatilidad en el monitoreo.

Clima

La capa geográfica de clima Caldas-Lang incluye las unidades de pisos térmicos y provincias de humedad, definidas con base en las variables de precipitación y temperatura media anual (Ideam *et al.*, 2020). En la Figura 17 se observan, además, variables de viento, relieve, continentalidad y vegeta-

ción. Esta clasificación se utiliza, específicamente, para la zonificación de los ecosistemas acuáticos lénticos y transicionales, permitiendo identificar y delimitar estos ecosistemas en función de sus condiciones climáticas particulares.

Figura 17. Modelo jerárquico diseñado para la zonificación de ecosistemas acuáticos



Nota: Movimiento del viento representado por las flechas blancas.

Fuente: Ideam *et al.* (2020).

Construcción del modelo cartográfico

Antes de iniciar la EMC, es necesario crear un modelo cartográfico utilizando la herramienta más adecuada en el software SIG. Este modelo facilita la ejecución de los geoprocursos necesarios para preparar las capas geográficas, lo que puede incluir la rasterización de capas vectoriales, la reclasificación de valores y otros ajustes necesarios para alistar los insumos que se emplearán en la EMC.

Como paso final, se lleva a cabo el proceso de superposición ponderada (*Weighted Overlay*), que permite combinar las capas geográficas aplicando los pesos previamente asignados a cada factor. Estos pesos se determinan a partir de la creación de una matriz de comparación de criterios, lo que permite que el análisis refleje adecuadamente la importancia relativa de cada variable en la zonificación.

Creación de la matriz de comparaciones de criterios - EMC

En este paso, se construye una matriz cuadrada cuyo número de filas y columnas corresponde al número de factores que se desee ponderar. Esta matriz permite realizar comparaciones entre pares de factores, evaluando su importancia relativa. La intensidad de importancia de cada valor se define

utilizando la escala de 1 a 9 propuesta por Saaty (1980), como se detalla en la Tabla 31. Este proceso facilita identificar los factores más relevantes y asignarles un peso adecuado dentro del proceso de monitoreo y seguimiento de los sistemas acuáticos.

Tabla 31. Escala de valoración PAJ

Intensidad de importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Ambas variables contribuyen de igual forma al objetivo
3	Moderada importancia	La experiencia y juicio favorecen un criterio sobre otro
5	Importancia fuerte	La experiencia y juicio favorecen fuertemente un criterio sobre otro
7	Importancia muy fuerte	La experiencia y juicio favorecen muy fuertemente un criterio sobre otro
9	Importancia extrema	La experiencia y juicio favorecen en extremo un criterio sobre otro
Recíprocas	$a_{ij} = 1 / a_{ji}$	Valor inverso

Fuente: Adaptado de Saaty (1980).

La matriz de comparaciones se elabora a partir de los criterios seleccionados y acondicionados, asignando puntuaciones que reflejan la importancia relativa de cada criterio en comparación con los demás. Estas puntuaciones se establecen con base en la escala de Saaty (1980) y permite realizar eva-

luaciones consistentes y cuantitativas. Los criterios se ordenan según su relevancia, determinada por el grupo investigador, considerando las posibles áreas con mayor potencial para la presencia de ecosistemas acuáticos. En la Tabla 32 se encuentra la propuesta, siguiendo esos parámetros.

Tabla 32. Matriz de comparaciones de criterios, según la escala de valoración del PAJ

Criterio	Coberturas de la tierra	Unidades de suelos	Tipo de relieve	Pendiente	Clima	wi	Ci	LAMDAi
Coberturas de la tierra	1,00	3,00	5,00	7,00	9,00	2,89	0,45	0,75
Unidades de suelos	0,33	1,00	3,00	5,00	5,00	1,90	0,29	1,33
Tipo de relieve	0,20	0,33	1,00	3,00	7,00	1,07	0,17	1,54
Pendiente	0,14	0,20	0,33	1,00	9,00	0,61	0,09	1,51
Clima	0,11	0,20	0,14	0,11	1,00	0,20	0,03	0,95

Fuente: Saaty (1980).

Una vez creada la matriz de comparaciones, se realiza el proceso de normalización de los valores, el cual estandariza los datos e integra todos los criterios o factores dentro de un mismo método de evaluación. Este paso asegura que los criterios sean evaluados en una misma escala de comparación, eliminando la dispersión de la información

y facilitando un análisis consistente (Berumen y Llamazares, 2007). En este contexto, se aplica el PAJ que asigna el peso a cada criterio, denominado autovectores (wi) y evalúa la consistencia de los juicios de valor entre pares de criterios mediante el cálculo del IC (Saaty, 1980).

$$\text{Autovector (wi): } w_1 = (1/l_1/l_2/l_3 \dots l_1/l_n) 1/n$$

$$\text{Normalización de autovectores (Ci): } C_1 = w_1/W$$

$$w_2 = (l_2/l_1/l_3 \dots l_2/l_n) 1/n$$

$$C_2 = w_2/W$$

$$w_n = (l_n/l_1/l_2 \dots 1) 1/n$$

$$C_n = w_n/W$$

Para evaluar la consistencia de la matriz de comparaciones, se calcula el valor λ_{\max} , que se obtiene sumando los valores propios (λ_i) de la matriz: $\lambda_{\max} = \sum \lambda_i$. Si este valor se aproxima al número de variables independientes (n), la matriz se considera consistente. Posteriormente, se calcula el IC que mide la desviación de λ_{\max} respecto a n . El IC se expresa como:

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1}$$

Además, se determina el ICA, que sirve como referencia para evaluar la consistencia relativa de la matriz. El ICA se expresa como:

$$ICA = \frac{1,98 * (n - 2)}{n}$$

Una vez calculados el IC y el ICA, se procede a determinar la Relación de Consistencia (CR), utilizando la fórmula:

$$CR = \frac{ICA}{IC}$$

Es importante destacar que, aunque el PAJ es una herramienta robusta, presenta ciertas limitaciones en decisiones ambientales complejas, como la zonificación para el monitoreo de ecosistemas acuáticos. Según Benítez *et al.* (2011), la inconsistencia puede surgir por falta de información o conocimiento al valorar los criterios (Stein y Mizzi, 2007), falta de experiencia en la metodología de evaluación o errores en la interpretación de las instrucciones sobre el proceso de análisis (Noble, 2004).

■ Fase 3 – Superposición ponderada de criterios

Después de completar el alistamiento de las capas geográficas, la creación de la matriz de comparación de factores y la normalización de valores, el siguiente paso es cruzar las capas geográficas de los factores mediante la herramienta de superposición ponderada. Este procedimiento combina tres pasos que se detallan así:

1. Reclasificación de valores: Los valores de los ráster de entrada se reclasifican en una escala común de evaluación (idoneidad, preferencia o riesgo), unificando las capas en una misma escala de análisis.
2. Aplicación de pesos: Los valores de cada celda en los ráster de entrada se multiplican por el peso de importancia asignado, previamente, a cada capa temática.
3. Suma de valores ponderados: Los valores ponderados de las celdas se suman para generar un ráster de salida que representa los resultados finales del análisis.

En el caso del Promsea, la superposición ponderada se realiza utilizando las capas geográficas disponibles con datos de caracterización biológica y física, aplicados a las diferentes áreas, zonas y subzonas hidrográficas del país. Este proceso permite asignar un factor de ponderación numérico a cada capa temática, según su importancia relativa, y luego superponerlas para obtener un mapa integrado.

Es importante que los rangos de valores de las capas de entrada correspondan a un intervalo común, entre 0 (no adecuado) y 1 (muy adecuado). En la capa de idoneidad resultante, las áreas con valores altos representan las más adecuadas para la actividad evaluada: en este caso, el monitoreo de los ecosistemas acuáticos. De acuerdo con estas fases, las herramientas SIG permiten que la metodología de zonificación de ecosistemas acuáticos desarrollada en el marco del Promsea sea implementada por diferentes entidades o instituciones, facilitando su aplicación en contextos regionales y locales.

Insumos y procesos metodológicos para el monitoreo de los ecosistemas acuáticos, a partir de imágenes con sensores remotos

Las técnicas de percepción remota permiten capturar y distribuir datos de manera eficiente, sobre áreas extensas, lo que facilita el análisis a diferentes escalas espaciales, ya sea en términos de área, zona o subzona hidrográfica, según la zonificación establecida por el Ideam (2013a). Para obtener los resultados necesarios, en el marco del Protocolo, se debe contar con insumos como imágenes satelitales, fotografías aéreas o capturas realizadas por aeronaves remotamente tripuladas (Unmanned Aircraft Systems [UAS]).

El cálculo de las superficies de expansión y contracción de los ecosistemas acuáticos se realiza mediante el procesamiento de imágenes de sensores remotos de media o alta resolución. Al combinar estas imágenes, con técnicas de análisis espacial, se genera cartografía a diferentes escalas (1 : 100.000, 1 : 25.000, 1 : 10.000 o incluso más

detalladas), que puede integrarse en los procesos de análisis y zonificación de los ecosistemas acuáticos. Además, se incluye información meteorológica para identificar periodos de sequía y de lluvias, acorde con los regímenes climáticos del país, los cuales han sido significativamente afectados, en los últimos años, por fenómenos como El Niño y La Niña.

Aunque existen diversos métodos y ecuaciones para el procesamiento digital de imágenes, esta propuesta prioriza el uso de índices espectrales por su facilidad de implementación y rapidez. Entre estos, se destacan los índices de agua y de vegetación, calculados a partir de imágenes de media y alta resolución espacial, que permiten caracterizar las dinámicas de los ecosistemas acuáticos con mayor precisión y eficiencia.

Relación escala – resolución espacial de imágenes de sensores remotos

Antes de iniciar las actividades de monitoreo de los ecosistemas acuáticos, es fundamental definir la escala cartográfica bajo la cual se presentarán los resultados obtenidos de imágenes capturadas con sensores remotos. Los mapas, al ser representaciones a escala del mundo real, dependen de esta escala para medir distancias, calcular áreas y realizar comparaciones entre objetos. La escala expresa la proporción de ampliación o reducción entre una distancia en el mapa y su equivalente en el terreno, teniendo en cuenta las transformaciones derivadas de los sistemas geográficos de coordenadas o sistemas de proyección (Burrough y McDonnell, 1998).

En este contexto, los mapas de pequeña escala representan la realidad de forma simplificada o generalizada, mientras que los mapas de gran escala

ofrecen una representación más detallada, aunque también selectiva. Por lo tanto, la selección de la escala debe basarse en los elementos del terreno que se deseen representar (puntos, líneas o polígonos). Cartográficamente, un mapa a una escala de 1 : 50.000 o menor se considera de gran escala, mientras que escalas de 1 : 100.000, se consideran de pequeña escala (Bugayevskiy y Snyder, 1995).

Para comprender mejor cómo los valores de la escala cartográfica se relacionan con los niveles en los que se levanta la información, en la Tabla 33 se presenta esta relación. Esto permite seleccionar la escala más adecuada para los objetivos específicos del monitoreo.

Tabla 33. Escalas cartográficas y niveles de levantamiento de información geográfica

Escala	Nivel de levantamiento
Menor a 1 : 10.000	Detallado
1 : 10.000. a 1 : 25.000	Semi detallado
1 : 25.000. a 1 : 100.000	Reconocimiento
Mayor a 1 : 100.000	Exploratorio

Fuente: Igac (2018).

En los siguientes apartados se abordan los diferentes insumos obtenidos mediante sensores remotos, y se asocian a las escalas cartográficas y resoluciones espaciales correspondientes a cada tipo de imagen.

Imágenes capturadas con sensores remotos

Mientras que el ojo humano solo puede detectar la luz visible, los satélites y las cámaras multiespectrales son capaces de captar tanto las bandas visibles como las invisibles del espectro electromagnético, lo que amplía significativamente el rango de análisis (Chuvieco, 1990). Por eso, los satélites y las cámaras multiespectrales son herramientas utilizadas en aplicaciones de teledetección.

Los satélites tienen la capacidad de observar la totalidad de la superficie terrestre, proporcionando datos continuos sobre cómo cambia a lo largo del

tiempo. Por otro lado, las cámaras multiespectrales están diseñadas para capturar imágenes detalladas de áreas específicas, permitiendo también monitorear los cambios en estas zonas en el tiempo. Ambas tecnologías son utilizadas para actividades como el mapeo y la clasificación de ecosistemas, coberturas terrestres, urbanizaciones y afectaciones ambientales. Estas herramientas no solo reducen el tiempo necesario para recopilar información en comparación con los estudios de campo, sino que, en muchos casos, también resultan más económicas (Chuvieco, 1990).



Imágenes satelitales ópticas

Los sistemas satelitales ópticos multispectrales son herramientas de teledetección pasiva que utilizan la luz solar, reflejada por la superficie terrestre, para capturar imágenes del planeta. Sin embargo, estos sensores presentan limitaciones, ya que no pueden coleccionar datos durante la oscuridad ni en condiciones atmosféricas adversas, como cobertura de nubes, neblina, polvo, granizo, humo u otros aerosoles que interfieran con la luz reflejada (Chuvieco, 2010).

Desde el lanzamiento de los primeros satélites,

diversas constelaciones han capturado datos ópticos, diferenciándose principalmente en su resolución espacial y espectral. Estas diferencias determinan la aplicabilidad de las imágenes en estudios específicos y en investigaciones ambientales. En el caso del Promsea se han identificado imágenes satelitales con características técnicas específicas que resultan adecuadas para el monitoreo de los ecosistemas acuáticos. Las características de estas imágenes, que han sido consideradas como insumos para el monitoreo, se detallan en la Tabla 34.

Tabla 34. Imágenes satelitales ópticas propuestas para la implementación del Promsea

Satélite	Propietario	Resolución				Expectativa	Tipo de acceso
		Espacial	Espectral	Radiométrica	Temporal		
Landsat 7	Nasa, USGS	30 m 15 m Pan	8 bandas	8 bits	16 días	1999 - Actual	Gratuito
Landsat 8	Nasa, USGS	30 m 15 m Pan	11 bandas	8 bits	16 días	2013 - Actual	Gratuito
Sentinel 2	ESA	10 m 20 m 60 m	13 bandas	12 bits	5 días	2015 - Actual	Gratuito
<i>RapidEye</i>	<i>RapidEye AG</i>	6,5 m	5 bandas	12 bits	Diaria	2008	Comercial
<i>Spot 6/7</i>	<i>Airbus</i>	6 m 1,5 m Pan	5 bandas	12 bits	Diaria	2012 - Actual	Comercial
<i>PlanetScope</i>	<i>Planet Labs</i>	3 m	4 bandas	12 bits	Diaria	2015 - Actual	NICFI (Nivel 1) Comercial
<i>QuickBird</i>	<i>DigitalGlobe</i>	2,62 m 0,65 m Pan	5 bandas	11 bits	1 - 3,5 días	2001 - 2015	Comercial

Satélite	Propietario	Resolución				Expectativa	Tipo de acceso
		Espacial	Espectral	Radiométrica	Temporal		
<i>Pléiades</i>	<i>Airbus</i>	2 m 0,5 m Pan	5 bandas	12 bits	Diaria	2011 - Actual	Comercial
<i>WorldView 4</i>	<i>Ball Aerospace</i>	1,24 m 0,31 Pan	5 bandas	11 bits	Diaria	2016 - Actual	Comercial

A partir de las características específicas de cada constelación satelital, se define el tipo de imágenes ópticas necesarias para monitorear los cambios en los ecosistemas acuáticos, en diferentes periodos de tiempo. Sin embargo, es importante considerar aspectos como el tipo de acceso a las imágenes, ya que aquellas con valor comercial implican costos elevados. Por lo cual, es importante prever un presupuesto adicional para garantizar la adquisición de estos insumos para las actividades de monitoreo.

Para el Promsea se proponen principalmente imágenes de acceso gratuito, como las proporcionadas por las constelaciones Landsat y Sentinel, debido a que su resolución espacial es adecuada para generar resultados a escala nacional. No obstante, dado que el protocolo debe ajustarse a las distintas escalas de monitoreo (nacional, regional y local), las imágenes necesarias para cada escala cartográfica se presentan en la Tabla 35, garantizando que la metodología pueda ser aplicada de manera flexible y precisa, según los objetivos planteados.

Tabla 35. Imágenes de satélite ópticas adecuadas para las diferentes escalas cartográficas

Escala	Rango de escala	Tipo de levantamiento e insumos
Nacional	1 : 100.000 o mayor	Representación de grandes extensiones. Por ejemplo, países, con fines de reconocimiento. Las imágenes apropiadas son Landsat (5, 7 y 8), <i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i> (Modis), Terra, entre otros
Regional	1 : 10.000, a 1 : 100.000	Levantamientos semi detallados, se recomiendan imágenes Sentinel 2, <i>RapidEye</i> , <i>Spot 6/7</i> , <i>PlanetScope</i>
Local	Menor a 1 : 10.000	Levantamiento a nivel de detalle, se recomiendan las imágenes <i>QuickBird</i> , Pléiades, <i>WorldView</i>



Imágenes satelitales de radar

Los sistemas de radar son herramientas de tele-detección activa que emiten señales de microondas hacia la superficie terrestre y procesan las señales reflejadas de retorno. Debido a la longitud de onda más larga que utilizan, estos sistemas son capaces de recolectar datos sin verse afectados por condiciones atmosféricas adversas, como nubes, neblina o lluvia. Esto los convierte en una opción ideal para observaciones en condiciones donde los sistemas ópticos resultan ineficientes. Además, las propiedades de retrodispersión del radar están relacionadas directamente con la topografía, las propiedades dieléctricas y la rugosidad de la superficie del terreno. Estas señales proporcionan información detallada sobre las características de la topografía. Es preciso anotar que, los sistemas de radar también tienen la ca-

pacidad de capturar imágenes múltiples, lo que permite generar vistas estereoscópicas (Chuvieco, 2010).

Al igual que las imágenes ópticas, las imágenes de radar pueden ser gratuitas o comerciales. Para el Promsea, es necesario utilizar imágenes de satélites vigentes, garantizando asertividad en el monitoreo de los ecosistemas acuáticos. En la Tabla 36 se describe una selección de los satélites más recientes que capturan este tipo de imágenes, ofreciendo opciones que cumplen con los requerimientos técnicos y operativos necesarios para el monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos existentes en el territorio colombiano.

Tabla 36. Imágenes satelitales de radar propuestas para la implementación del Promsea

Satélite	Propietario	Resolución espacial	Banda	Polarización	Expectativa	Tipo de acceso
Sentinel 1	Agencia Espacial Europea (ESA)	9 - 40 m	C	VV HH VV+VH HH+HV	2014 - Actual	Gratuito

Satélite	Propietario	Resolución espacial	Banda	Polarización	Expectativa	Tipo de acceso
Radarsat - 2	Agencia Espacial Europea (ESA)	3 - 20 m	C	Selectiva: (HH y HV) o (VH y VV) Single: (HH) Quad: (HH, VV, HV, VH) Selectiva Single: (HH) o (HV) o (VH) o (VV)	2005 - Actual	Comercial
Kompsat 5	Instituto de Investigación Aeroespacial de Corea (Kari)	1 - 20 m	X	Single (HH o VV) Dual (HH/VV o HH/VH o VV/HV)	2013 - Actual	Comercial
TerraSAR - X	Centro Espacial Alemán (DLR)	0,5 - 40 m	X	Single (HH o VV) Dual (HH/VV o HH/VH o VV/HV)	2007 - Actual	Comercial

Las imágenes de radar también son insumos aptos para trabajar a diferentes escalas cartográficas. Estas están disponibles en la forma original en que han sido capturadas; luego, el ancho de las escenas es establecido por la forma de barrido en se haya desplazado el satélite, y de acuerdo con la

resolución espacial de cada tipo de imagen (Gambini, 2006). En la Tabla 37 se presentan las imágenes de radar más adecuadas para el monitoreo de ecosistemas acuáticos a escala nacional, regional y local.

Tabla 37. Imágenes de satélite de radar adecuadas para las diferentes escalas cartográficas

Escala	Rango de escala	Tipo de levantamiento e insumos
Nacional	1 : 100.000. o mayor	Representación de grandes extensiones, las imágenes apropiadas son Radarsat-2, KompSat, TerraSAR - X
Regional	1 : 10.000. a 1 : 100.000	Levantamientos semi detallados, las imágenes apropiadas son Radarsat - 2, KompSat, TerraSAR - X
Local	Menor a 1 : 10.000	Levantamiento a nivel de detalle, las imágenes apropiadas son Radarsat - 2, KompSat, TerraSAR - X

Fotografías aéreas

Además de las imágenes satelitales, las fotografías aéreas también son importantes insumos obtenidos mediante sensores remotos. Las naves aéreas o aviones son equipados con cámaras especializadas y desde allí se capturan imágenes del terreno. Estas fotografías se basan en la propiedad de los cuerpos de absorber, dispersar o refractar la luz solar, que atraviesa la lente de la cámara y modifica la intensidad registrada en la película sensible al espectro electromagnético instalada en su interior (Deagostini, 1984). De ese

modo registran, en películas de alta velocidad, información detallada de la superficie terrestre.

Estas cámaras se clasifican según características como su campo angular, distancia focal e inclinación del eje óptico, entre otros parámetros técnicos que determinan su funcionalidad y precisión. En la Tabla 38 se describen los diferentes tipos de cámaras utilizadas en la toma de fotografías aéreas, con sus aplicaciones para el análisis y monitoreo de ecosistemas acuáticos.

Tabla 38. Clases de cámaras para la toma de fotografías aéreas

Tipo de cámara	Características
Cámara normal	Campo angular reducido de menos de 75 ° Distancia focal de 210 mm Alta precisión planimétrica
Cámara gran angular	Campo angular de 90 ° Distancia focal de 15 mm Cubrimiento de mayor área de terreno
Cámara super gran angular	Campo angular mayor a 100 ° Distancia focal de 90 mm Cubrimiento de mayor área en comparación con la cámara gran angular

Fuente: Deagostini (1984).

El uso de fotografías aéreas permite generar mapas a gran escala, alcanzando valores que van desde 1 : 500 hasta 1 : 10.000 o incluso más detallados. Esto hace que sean especialmente útiles para trabajar a nivel de subzonas hidrográficas, donde se requiere un alto nivel de precisión. En términos de

resolución espacial, las fotografías aéreas pueden lograr niveles que varían entre 7 cm en áreas urbanas y 30 - 50 cm en zonas rurales, dependiendo de la altura del vuelo y de la distancia focal de la cámara utilizada (Chuvieco, Salas y Martín, 2008).

Sin embargo, esta técnica presenta ciertas limitaciones, como la altura máxima que puede alcanzar el avión, la interferencia de condiciones atmosféricas (nubes, neblina, entre otras) y la disponibilidad

para realizar los vuelos. Estos servicios pueden ser proporcionados por el Igac, entidad estatal encargada de estas actividades o, por empresas privadas especializadas.

Imágenes de sistemas aéreos no tripulados

El monitoreo de ecosistemas acuáticos mediante imágenes capturadas con vehículos aéreos no tripulados UAS requiere el uso de cámaras semimétricas multiespectrales que cubran tanto las bandas del espectro visible como las del infrarrojo. Esto permite realizar cartografía a escalas muy grandes, que van desde 1 : 100 hasta 1 : 500, dependiendo de la altura máxima alcanzable por la aeronave y

las condiciones atmosféricas (como lluvias) que pueden limitar los vuelos (Torres-Sánchez *et al.*, 2013). Dado el alto nivel de detalle que ofrecen las imágenes de UAS, su uso se propone para escalas muy grandes, como en ventanas de monitoreo específicas definidas dentro del Promsea.

Procesamiento digital de imágenes para el Promsea

Luego de adquirir los insumos necesarios para el monitoreo de los ecosistemas acuáticos representados, en este caso por imágenes obtenidas mediante sensores remotos, se debe realizar el procesamiento digital. Este procedimiento varía según el tipo de imagen: si se trata de imágenes multies-

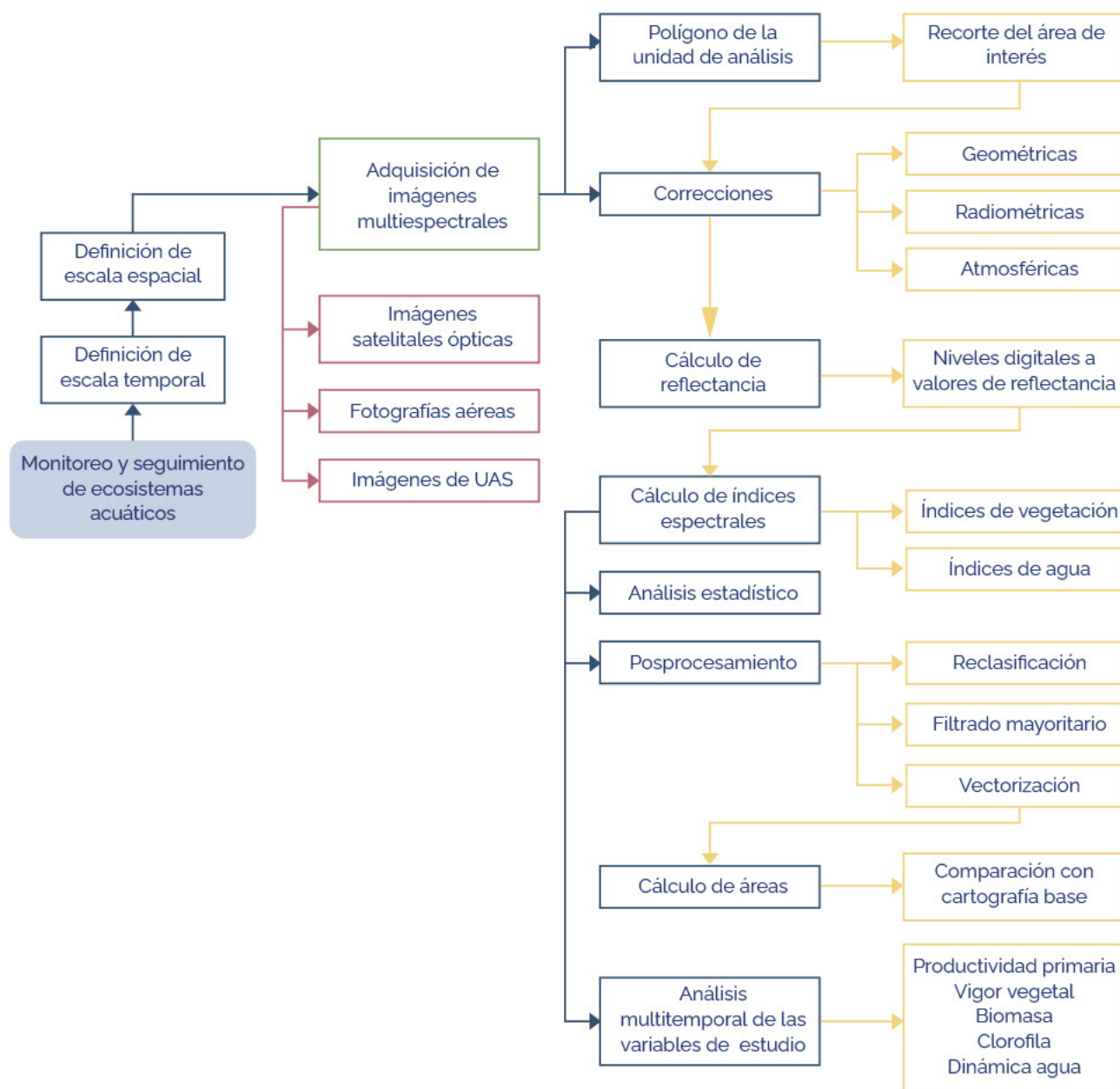
pectrales, como las capturadas por satélites ópticos, fotografías aéreas o UAS o si, por el contrario, se trata de imágenes pancromáticas de una sola banda, como las generadas por sensores de radar. A continuación, se describen estos procedimientos en el marco del Promsea.

Procesamiento de imágenes multiespectrales

La propuesta metodológica para el monitoreo y seguimiento de ecosistemas acuáticos, a partir de imágenes de sensores remotos multiespectrales, incluye diversos procesos de teledetección para estudiar los cambios estacionales de los ecosistemas. Uno de los procesos para la implementación más usados es la aplicación de índices espectrales. Para su obtención, es necesario contar con

las bandas del visible (rojo, verde y azul), y con las del infrarrojo, que son las necesarias para calcular la mayoría de ecuaciones (Chuvieco, 2010). Es así como, el diseño metodológico está compuesto por diferentes fases, como se muestra en la Figura 18, las cuales pueden ser aplicadas para imágenes de satélite ópticas, fotografías aéreas o imágenes de UAS.

Figura 18. Diagrama metodológico para el procesamiento digital de imágenes de sensores remotos multiespectrales



Según lo expuesto, para el Promsea, varios de estos procesos pueden realizarse para analizar diferentes aspectos que se presentan en la Tabla 39, y que se asocian a las variables funcionales de estos sistemas

Tabla 39. Índices espectrales propuestos para el monitoreo de ecosistemas acuáticos

Atributo	Variable	Tipo de medición	Fuente
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI) $NDVI = \frac{NIR - Rojo}{NIR + Rojo}$	Productividad primaria neta aérea (PPNA)	Productividad anual de la vegetación acuática y ecosistemas inundables	(Tucker <i>et al.</i> , 1985) (Hilker <i>et al.</i> , 2007).
	Vigor o salud vegetal	Estado de la vegetación acuática o vegetación de ecosistemas inundables	(Song, Dannenberg y Hwang, 2013)
	Biomasa	Presencia de biomasa	(Eisfelder, Kuenzer y Dech, 2012)
Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)	Biomasa	Presencia de biomasa con corrección del brillo del suelo	(Rondeaux <i>et al.</i> , 1996)
Índice de Área Foliar $LAI = -\frac{\ln\left(0,69 - \frac{SAVI}{0,59}\right)}{0,91}$	Evapotranspiración	Características biofísicas asociadas a las copas de los árboles	(Tucker y Sellers, 1986)
GCI $GCI = \left(\frac{NIR}{Verde}\right) - 1$	Clorofila	Detecta la presencia de clorofila, que indica contaminación por nutrientes que impulsa el crecimiento de las algas	(Falcowski <i>et al.</i> , 1998)
Índice de Diferencia de Agua Normalizado (NDWI, por su sigla en inglés) $NDWI = \frac{Verde - NIR}{Verde + NIR}$	Dinámica y extensión de agua	Mide la cantidad de agua que posee la vegetación o el nivel de saturación de humedad que posee el suelo	McFeeters (1998)

Atributo	Variable	Tipo de medición	Fuente
<p>Índice de Diferencia de Agua Normalizado Modificado (MNDWI, por su sigla en inglés)</p> $MNDWI = \frac{\text{Verde} - SWIR}{\text{Verde} + SWIR}$	Dinámica y extensión de agua	Medición de la extensión de los territorios cubiertos de agua que separa de las demás coberturas terrestres	(Ariza <i>et al.</i> , 2013)

Nota: Infrarrojo cercano (NIR). Infrarrojo de onda corta (SWIR).

Una vez sean definidas las variables que se quieren analizar, a partir de los diferentes índices espectrales mencionados, se debe proceder con diferentes etapas para el tratamiento de los datos.

Análisis estadístico de los valores de los índices espectrales

Luego de realizar el cálculo de los índices espectrales mencionados, se debe proceder con el cálculo de los valores estadísticos que facilitan la interpretación de los resultados. A continuación, se proponen los cálculos para el análisis de los cambios en los ecosistemas acuáticos.

- Coeficiente de asimetría

El valor del coeficiente de asimetría es arrojado al momento de calcular los histogramas en el *software* SIG para cada uno de los archivos ráster resultantes, según lo propuesto por el profesional del componente estadístico. Las medidas de asimetría son indicadores que permiten establecer el grado de simetría que presenta una distribución de probabilidad de una variable aleatoria, que en este caso corresponden a los índices espectrales empleados. Este coeficiente de asimetría (*skewness*), permite analizar la distribución de los datos, con lo cual se define si la variable sigue una distribución

normal o no; en caso de que se presente asimetría negativa los valores se distribuyen hacia la izquierda, y asimetría positiva cuando los valores se distribuyen hacia la derecha.

- Estadísticos zonales

Debido a que los ecosistemas acuáticos pueden presentar variaciones en su dinámica multitemporal, el cálculo de los estadísticos zonales sobre cada imagen ráster, resultante del cálculo de los índices espectrales, se hace para calcular diversos estadísticos para una o varias zonas, previamente definidas, mediante la creación de un archivo vectorial. Para el Promsea las zonas definidas son los polígonos clasificados como ecosistemas síntesis (Ideam *et al.*, 2017), y que corresponden a los ecosistemas acuáticos a monitorear; así mismo, los estadísticos calculados son seleccionados según las necesidades del investigador.

- Coeficiente de variación

Una vez calculados los estadísticos zonales, se procede a calcular el Coeficiente de Variación (CV), para cada uno de los índices espectrales. En este caso, representa los cambios presentados de los valores de los índices espectrales en una temporalidad definida (Ávila y Tamé, 2020). Para el caso

del monitoreo de ecosistemas acuáticos, se definió un mínimo de diez años como medida estadística, también usada para analizar la variación de los índices espectrales. El CV se expresa en porcentaje para tener mayor facilidad en su interpretación, y se obtiene con la siguiente ecuación:

$$CV = \left(\frac{DS}{Media} \right) * 100$$

Donde:

CV: Coeficiente de variación

DS: Desviación estándar

Para el caso de los índices espectrales de agua, la media se debe tomar como valor absoluto en casos en los que los valores sean negativos, de forma tal que estos valores sean positivos antes de proceder con el cálculo del CV. En el CV, los valores

altos indican que hubo cambios representativos en la dinámica del ecosistema y los valores bajos indican que el ecosistema acuático es estable y que no hubo mayores cambios.

Posprocesamiento de los resultados de los índices espectrales

Una vez calculados los índices espectrales mediante métodos tradicionales o plataformas especializadas como Google *Earth Engine* o el Cubo de Datos de Colombia (CDCOL) (Ideam, 2021a), se aplican herramientas adicionales para optimizar la interpretación de los resultados. Estas herramientas permiten automatizar procesos dentro de un modelo cartográfico, facilitando el análisis de la dinámica y extensión de los ecosistemas acuáticos.

El posprocesamiento incluye varias etapas:

- Reclasificación de valores de pixel para mejorar la interpretación visual. Se utiliza el método de quiebres naturales o método de Jenks para generar intervalos de datos basados en los valores de los índices espectrales,

permitiendo asignar simbología adecuada a los mapas generados.

- Filtrado de pixeles para optimizar la calidad de la imagen. Al clasificar, pueden generarse clases, con áreas muy pequeñas, dentro de categorías más extensas. Para corregir esto, se emplea la herramienta de filtrado mayoritario, que reemplaza los pixeles aislados con el valor predominante en su entorno.

- Vectorización, mediante la conversión de formato ráster a vectorial. Este proceso genera polígonos correspondientes a cada una de las clases obtenidas en la reclasificación, y facilita la comparación con cartografía base existente de ecosistemas acuáticos.

- Cálculo de geometrias de área, paso clave para cuantificar la extensión de cada clase en el archivo vectorial resultante. Esto permite realizar comparaciones entre distintos periodos temporales y visualizar cambios en la superficie de los ecosistemas monitoreados.

- Análisis multitemporal, donde se comparan las áreas delimitadas, a lo largo del tiempo, para identificar tendencias y variaciones en la dinámica de los ecosistemas acuáticos.

Procesamiento de imágenes de radar

Las imágenes de radar, al igual que las imágenes ópticas, son herramientas eficaces para la identificación y monitoreo de ecosistemas acuáticos. Su principal ventaja radica en su capacidad de capturar información independientemente de las condiciones meteorológicas o la iluminación, lo que las hace especialmente útiles en regiones con alta nubosidad o para estudios que requieran un monitoreo continuo. El procesamiento de estas imágenes se basa en técnicas de segmentación y clasificación digital, lo que permite discriminar las coberturas del territorio y organizarlas en categorías homogéneas (Ferrero, 2004). Estas técnicas han sido ampliamente documentadas en la literatura especializada, y se destaca su aplicación en los estudios de ecosistemas acuáticos y terrestres (Frery *et al.*, 1999).

A continuación, se describen los procesos principales que se realizan a partir de imágenes de radar.

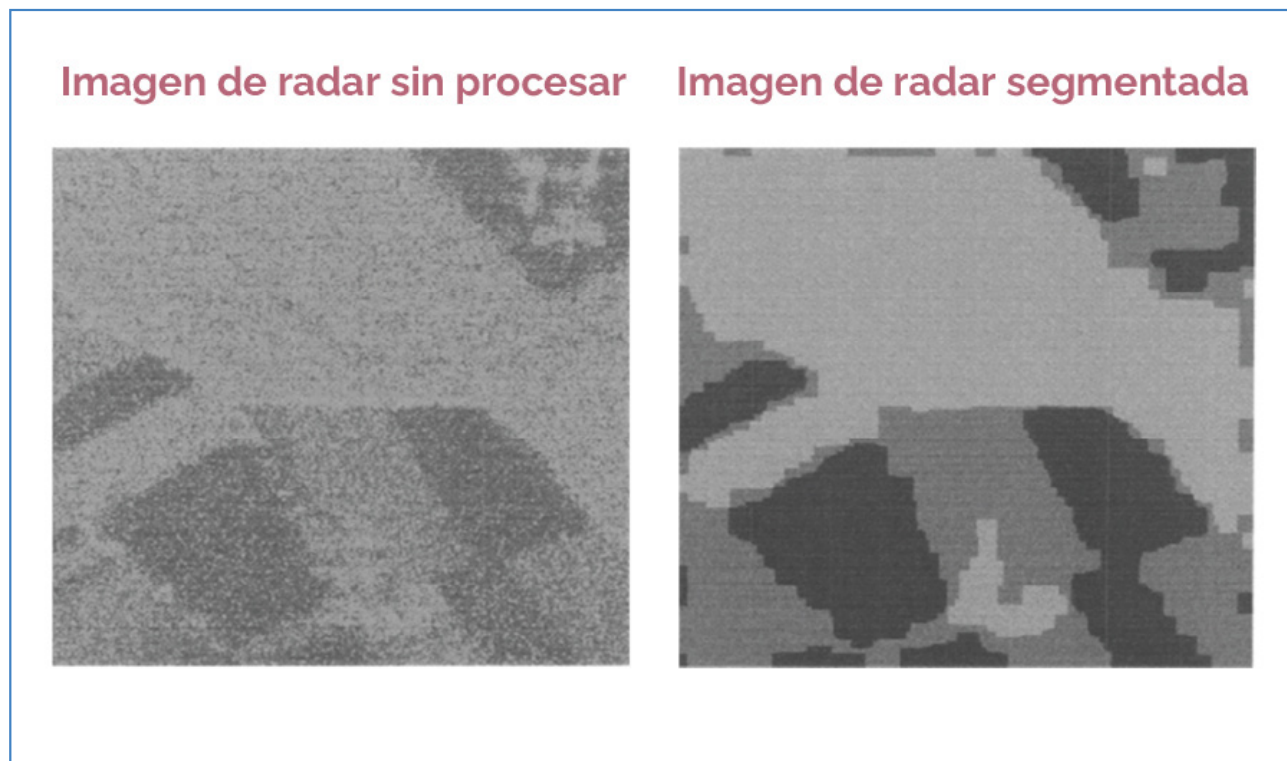
1. Segmentación: La segmentación es el primer paso en el procesamiento de imágenes de radar y consiste en la subdivisión de la imagen en regiones, con características similares, sin hacer referencia explícita a una cobertura terrestre específica. Para ello se utilizan, en la imagen, algoritmos que analizan dos propiedades fundamentales de los niveles de gris: la discontinuidad y la similitud. La discontinuidad permite dividir la imagen identificando cambios abruptos en la intensidad del reflejo, lo que facilita la delimitación de puntos, líneas y bordes dentro de la imagen. Por otro lado, la similitud se basa en el análisis de umbrales, crecimiento de regiones y técnicas de división y fusión para agrupar áreas con propiedades espectrales semejantes (Martín, 2002).

Sin embargo, las imágenes de radar presentan un tipo de ruido conocido como *speckle*, que genera interferencias y dificulta la interpretación visual y digital de la imagen. Este ruido afecta la precisión de la segmentación, por lo que es necesario aplicar técnicas de filtrado para reducirlo. Dependiendo del nivel del *speckle* ruido presente, se pueden utilizar diferentes métodos de suavizado o, en algunos casos, fusionar las imágenes de radar con otras provenientes de sensores ópticos para mejorar la calidad del análisis (Avendaño, *et al.*, 2014).

En el proceso de segmentación, es necesario definir los criterios de agrupación de píxeles y el tamaño de los segmentos generados. La agrupación se establece con base en la distancia mínima que deben compartir los píxeles para ser considerados parte de un mismo segmento, asegurando que las unidades resultantes reflejen patrones reales del paisaje. El tamaño del segmento depende del propósito del análisis y de la escala espacial del producto final, ya que segmentaciones más finas pueden ser útiles para estudios detallados, mientras que agrupaciones más amplias facilitan la identificación de tendencias generales en grandes extensiones de territorio (Avendaño *et al.*, 2014).

El resultado de la segmentación es una nueva imagen en la que los ecosistemas acuáticos pueden diferenciarse con mayor claridad (Figura 19). Esta imagen segmentada sirve como base para la posterior clasificación digital, donde se asignan etiquetas a cada segmento en función de su cobertura terrestre. A partir de este proceso, es posible identificar cuerpos de agua, vegetación acuática, suelos inundables y otras unidades de interés.

Figura 19. Ejemplo de proceso de segmentación para imágenes de radar



Fuente: Loccisano (1996).

2. Clasificación: El proceso de clasificación es similar al de segmentación, ya que también consiste en agrupar píxeles con características similares. Sin embargo, en este caso, la agrupación se realiza con base en clases previamente establecidas. Existen varios métodos de clasificación de imágenes de radar, entre los que se incluyen la clasificación no supervisada y supervisada, la clasificación orientada a objetos, las técnicas basadas en lógica difusa y aquellas fundamentadas en árboles de decisión (Ideam, 2011).

En el marco del Promsea, se propone el uso de clasificación supervisada y no supervisada para diferenciar las superficies de agua y otros ecosistemas acuáticos. En las imágenes de radar, el

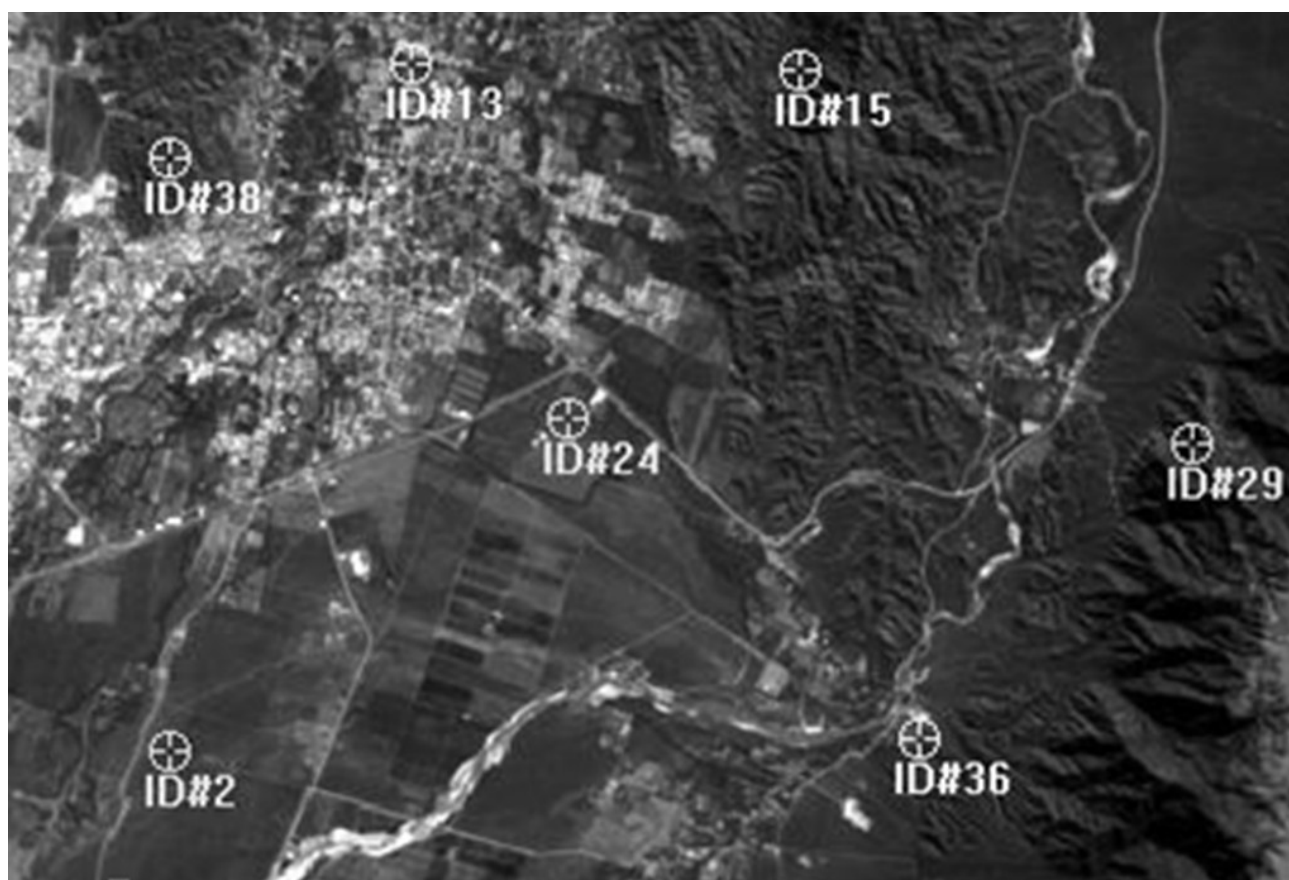
agua se distingue con facilidad debido a la tonalidad más oscura de sus píxeles, lo que facilita su delimitación (Loccisano, 1996). No obstante, en el caso de ecosistemas inundables como sabanas, bosques, arbustales y herbazales o pastizales inundables, se recomienda el uso de imágenes multiespectrales. Esto se debe a que, en imágenes pancromáticas, la diferenciación de estos ecosistemas es más compleja debido a la falta de contraste entre tonalidades y la interferencia de factores como sombras, incidencia de la luz y pendientes (Avendaño *et al.*, 2014).

Sin embargo, las imágenes de radar presentan un tipo de ruido conocido como *speckle*, que genera interferencias y dificulta la interpretación

3. Evaluación de exactitud: Los resultados obtenidos a partir de los procesos de segmentación o clasificación pueden evaluarse mediante matrices de confusión, donde las regiones de referencia corresponden a la segmentación esperada, cuya delimitación es conocida con precisión. En estas matrices, los porcentajes reflejan la proporción de

píxeles de referencia clasificados correctamente e incorrectamente. Para llevar a cabo esta evaluación, es necesario definir un número de puntos de validación, cuyo tamaño dependerá de la cantidad de clases establecidas en el proceso de clasificación (ver Figura 20).

Figura 20. Ejemplo de toma de puntos para la evaluación de la exactitud



De este modo, el software genera un reporte que incluye la matriz de confusión, en la cual se comparan los valores de la clase de referencia con los valores asignados por el intérprete. Esta matriz se

organiza en filas y columnas de dimensión $(a \times a)$, donde a representa el número de clases definidas en el proceso de clasificación (ver Tabla 40).

Tabla 40. Ejemplo de una matriz de confusión para clasificación supervisada

	Datos clasificados			
	Bosque	Suelo preparado	Cerca viva	Río
Sin clasificar	0	0	0	0
Zona urbana	5	0	4	0
Vías	0	0	0	0
Cultivo	4	0	0	0
Bosque	3	0	0	0
Suelo preparado	0	2	0	0
Cerca viva	0	0	8	0
Río	0	0	0	0
Pastos limpios	0	0	0	0
Riviera	0	0	0	0
Cuerpo de agua	0	0	0	0
Suelo desnudo	0	0	0	0
Total de columnas	12	2	12	0

Las columnas de la matriz de confusión reflejan los errores de omisión: es decir, los píxeles de la región de interés que no fueron correctamente identificados en la clasificación. Por su parte, las filas representan los errores de comisión, que corresponden a los píxeles de otras regiones que fueron erróneamente clasificados como parte de la región de interés. La diagonal principal de la matriz contiene los valores que suman todas las predicciones correctas: es decir, las clases que han sido correctamente clasificadas.

Además, la exactitud del usuario permite identificar falsos positivos, donde los píxeles han sido asignados a una clase incorrecta. Por ejemplo, cuando la

clasificación sugiere que una cobertura es de tipo urbano cuando en realidad no lo es. Asimismo, se pueden detectar falsos negativos, que ocurren cuando los píxeles son clasificados dentro de una clase equivocada, como en el caso de una cobertura que se clasifica como bosque cuando en realidad corresponde a un cultivo.

Al evaluar la exactitud temática, se puede determinar si es necesario realizar ajustes en los procesos de clasificación o si se requiere utilizar un método diferente que permita mejorar la identificación de los ecosistemas acuáticos. Para este análisis, se toma como referencia el MEC (Ideam *et al.*, 2017).



Río Amazonas

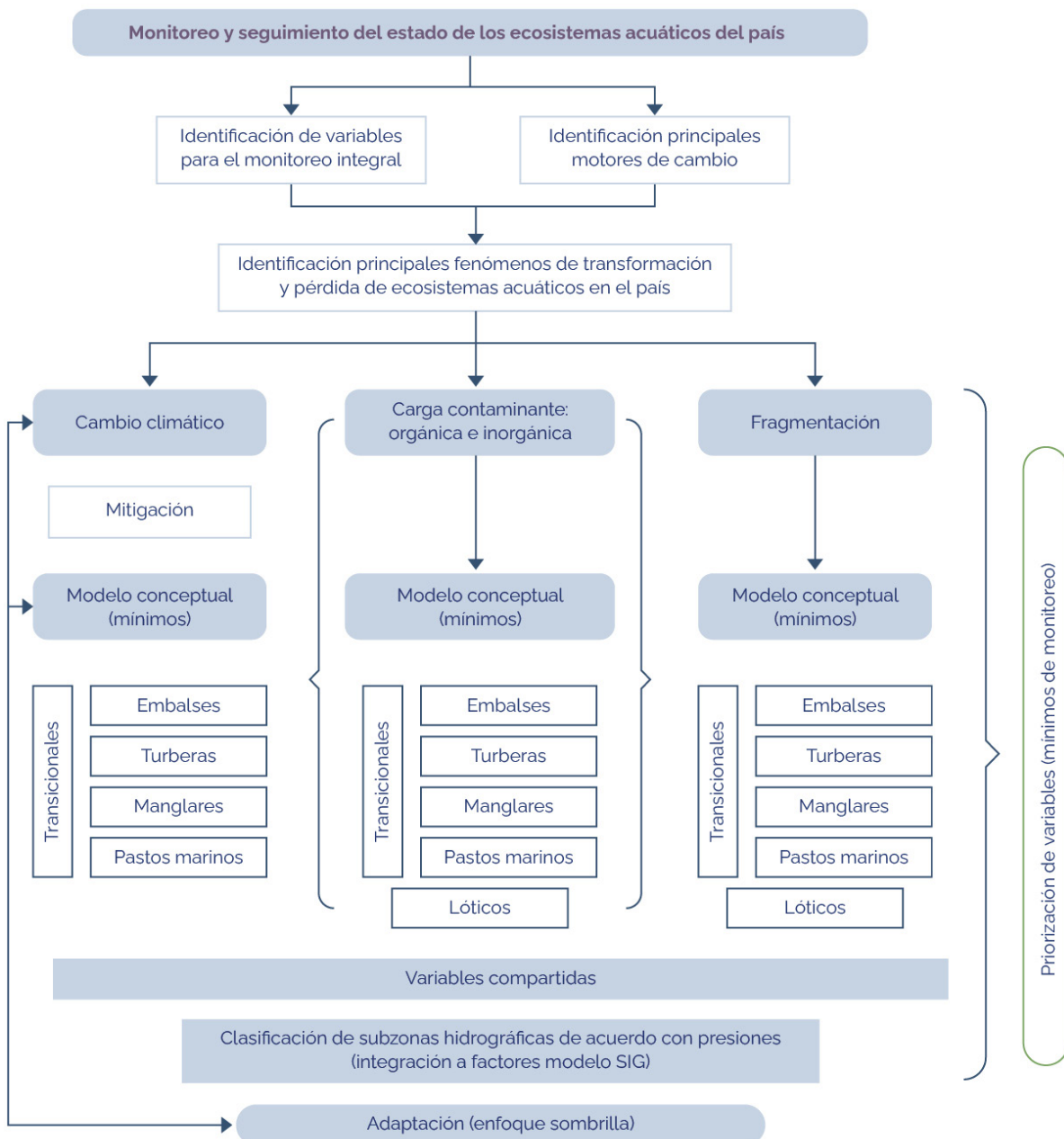


Monitoreo de los fenómenos de transformación priorizados

La metodología propuesta se centra en el monitoreo de las principales presiones que afectan a los ecosistemas acuáticos. De ahí que aquí se priorizan tres fenómenos de transformación: carga contaminante (orgánica e inorgánica), fragmentación y cambio climático. Estos fenómenos guían el diseño

de modelos conceptuales y metodológicos orientados al monitoreo a escala nacional, asegurando un enfoque eficiente y focalizado. Además, la metodología incluye la regionalización (zonificación) del monitoreo, adaptándolo a la diversidad de ecosistemas acuáticos del país.

Figura 21. Hoja de ruta de la propuesta metodológica del Promsea en Colombia



La zonificación permite la creación de modelos específicos y adaptativos, diseñados para identificar variables e indicadores que posibilitan el análisis ajustado a las características de cada área hidrográfica en estudio.

La Figura 21 muestra el proceso seguido para plantear el Promsea, el cual comenzó con la identificación de variables necesarias para el monitoreo integral y la determinación de los principales motores de cambio que afectan estos ecosistemas. A partir de estos elementos, se priorizaron los tres fenómenos (carga contaminante (orgánica e inorgánica), fragmentación y cambio climático). En primer lugar, el cambio climático se analiza con un enfoque orientado a la mitigación, integrando un modelo conceptual que incluye ecosistemas como embalses, turberas, manglares y pastos marinos. En segundo lugar, la carga contaminante utiliza un modelo conceptual similar, incorporando ecosistemas como embalses, turberas, manglares, pastos marinos y sistemas lóticos. La fragmentación, en cambio, se aborda a través de un modelo que con-

sidera la dinámica de bosques, herbazales, arbustales, sabanas inundables y sistemas lóticos.

La metodología establece variables compartidas entre los fenómenos para garantizar un enfoque integrador. Además, se clasifica el territorio en subzonas hidrográficas basadas en las presiones específicas que enfrentan, utilizando herramientas de sistemas de información geográfica (SIG). Finalmente, se adopta un enfoque adaptativo que facilita la regionalización y priorización de variables, permitiendo ajustar el monitoreo a las características y necesidades de cada ecosistema, logrando así un análisis más detallado y efectivo.

Es importante mencionar que, si bien la metodología desarrollada plantea un universo de variables que pueden ser monitoreadas, medir todas las variables posibles a nivel nacional es complejo e implica altos costos. Por lo que, al aplicar el Promsea, se hace necesario priorizar aquellas que ofrecen información para evaluar el estado de los ecosistemas, optimizando los recursos disponibles.

Monitoreo de la carga contaminante, orgánica e inorgánica, en ecosistemas acuáticos

La contaminación en los ecosistemas acuáticos se define como el estrés ambiental generado por la introducción de elementos o energía externos, resultado de las actividades humanas. En los cuerpos de agua, este estrés puede manifestarse en alteraciones físicas, como el ingreso de sólidos, sales y cambios en el potencial de hidrógeno (pH) o en la temperatura. También se identifica por el aporte de materia orgánica, nutrientes y sustancias tóxicas, entre ellas los metales pesados, pesticidas y fenoles. Además, puede incluir el ingreso de energía térmica, lo que afecta la estabilidad del ecosistema (Dominguez y Giorgi, 2020). En el

ámbito marino, incluyendo los estuarios, el Grupo de Expertos sobre los Aspectos Científicos de la Protección del Medio Marino (GESAMP, por su sigla en inglés de *Group of Expert on the Scientific Aspects on Marine Environmental Protection*) define la contaminación como cualquier proceso que pueda causar daños a la vida marina y a los recursos vivos. Además, representa un riesgo para la salud humana, puede obstaculizar las actividades marítimas como la pesca. Del mismo modo, puede deteriorar la calidad del agua o afectar áreas de recreación.

La capacidad natural de los cuerpos de agua para depurar contaminantes ha disminuido, significativamente, debido al crecimiento de la carga contaminante. Factores como el aumento poblacional, el desarrollo tecnológico acelerado y los megaproyectos, como grandes embalses, explotaciones mineras y complejos industriales, han incrementado la entrada de materiales con baja degradabilidad, como metales pesados y plaguicidas. Estos compuestos no solo permanecen en el agua y los sedimentos, sino que también pueden acumularse en organismos vivos. Afectan la biodiversidad y reducen las condiciones óptimas para la vida acuática. Aunque todas las actividades humanas generan impacto en su entorno, la magnitud actual de estas alteraciones es inédita y representa un desafío ambiental sin precedentes (Dominguez y Giorgi, 2020).

En Colombia, la mayor presión por carga contaminante en ecosistemas acuáticos superficiales se concentra en 150 municipios distribuidos en 87 subzonas hidrográficas, responsables del 93 % de la demanda biológica de oxígeno, el 90 % de la demanda química de oxígeno y el 92 % de los sólidos suspendidos totales. Las descargas de los sectores industrial, doméstico y cafetero han convertido la región del Magdalena-Cauca en el principal foco de contaminación hídrica del país, debido a su alta densidad poblacional e industrial (Ideam, 2019a).

El impacto de la contaminación en los ecosistemas marinos es particularmente evidente en las zonas costeras, donde existe un vínculo directo con las actividades humanas que allí se desarrollan. A esa situación se suma un desafío aún más complejo: las fuentes terrestres de contaminación, que pueden ubicarse a grandes distancias del mar y afectar vastas extensiones del medio ambiente marino. Sectores como el turismo, la industria, la agricultura, la minería y la navegación contribuyen al aumento de sedimentos, nutrientes y contaminantes que son transportados a través de los ríos y desembocan en las aguas marinas. Estos elemen-

tos, debido a su toxicidad y persistencia, impactan, directamente, ambientes vulnerables como los estuarios, humedales y zonas costeras (Convenio Protección Medio Marino, 2018).

Entre las fuentes directas de contaminación se incluyen las aguas residuales, los plaguicidas y los hidrocarburos. En la costa Caribe, los Compuestos Orgánicos Persistentes (COP), como hidrocarburos y plaguicidas organoclorados, afectan principalmente a grandes centros urbanos como Santa Marta, Barranquilla y Cartagena, así como a los golfos de Morrosquillo y Urabá. En el océano Pacífico, las zonas más impactadas se encuentran en los puertos de Tumaco y Buenaventura. También puede mencionarse la contaminación de los ríos que atraviesan el departamento de Nariño (Inveemar, 2006).

A pesar de los esfuerzos colombianos para monitorear y mitigar el impacto de las actividades humanas en los ecosistemas acuáticos, la gestión del agua sigue enfocada principalmente en su calidad y cantidad, con normativas centradas en el control de vertimientos, sin considerar al recurso como un espacio vital para comunidades biológicas. Según Meybeck *et al.* (2002), la calidad del agua se refiere a su capacidad para sostener distintos usos o procesos, mientras que la calidad biológica se mide a través de los cambios estructurales en las comunidades de organismos (Prat *et al.*, 2009). Esto implica que una buena calidad biológica del agua es aquella que permite sostener una comunidad acuática similar a la que existiría en condiciones naturales, independientemente de si es apta para el consumo humano. No obstante, dicha calidad es fundamental para mantener los servicios ecosistémicos que los cuerpos de agua prestan (Dominguez y Giorgi, 2020).

A continuación, se presentan los modelos conceptuales y metodológicos que permitirán viabilizar su monitoreo a nivel nacional.



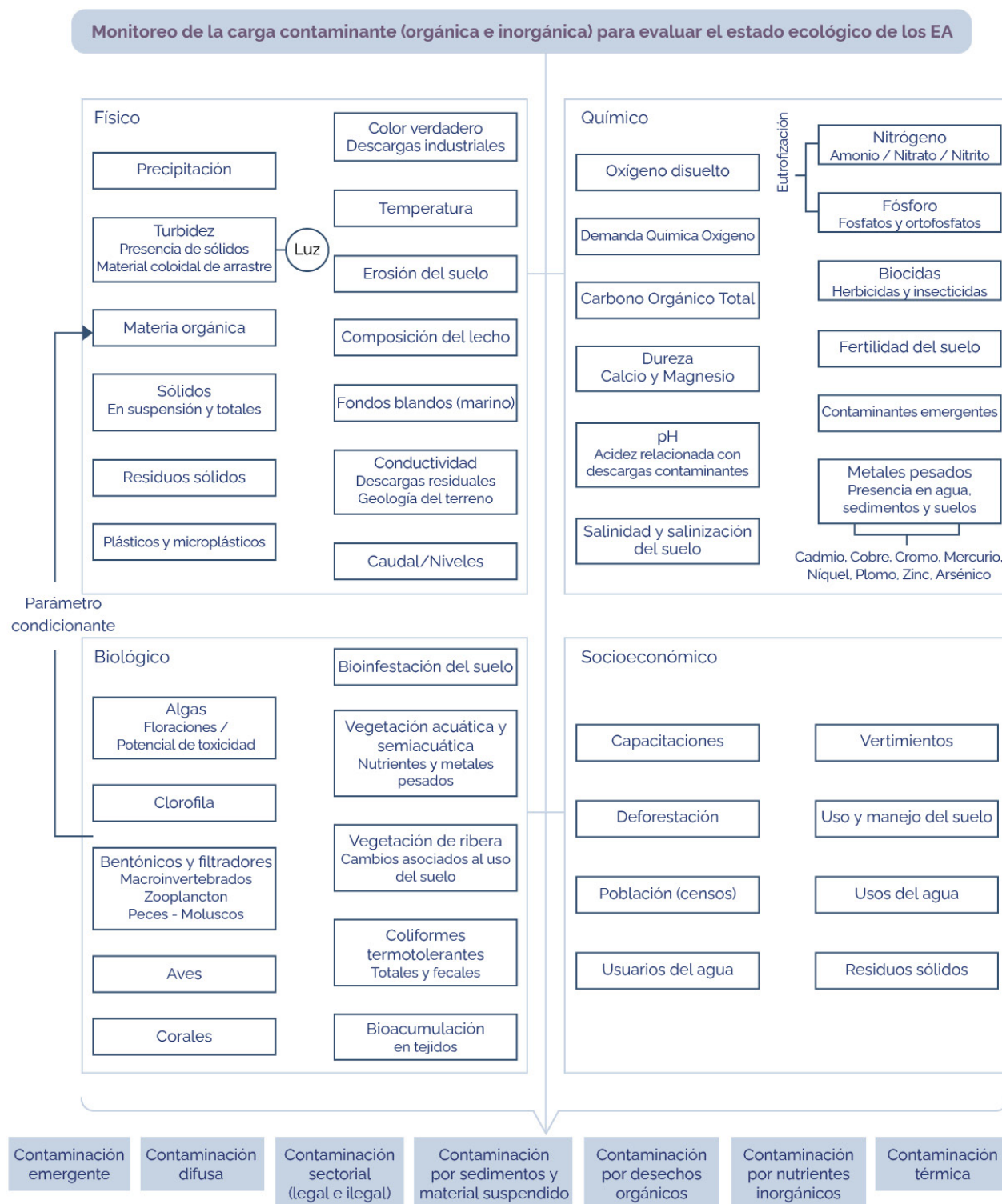
Caño Correa. Canal del Dique María la Baja - Bolívar

Propuesta metodológica para evaluar la carga contaminante

Actualmente, existen diversos métodos para estimar la carga contaminante en los ecosistemas acuáticos, muchos de ellos basados en técnicas avanzadas altamente eficientes, pero que implican costos elevados. Sin embargo, para evaluar este fenómeno, a escala nacional, es fundamental adoptar un enfoque costo-eficiente que garantice la viabilidad del monitoreo, a lo largo del tiempo (ver

Figura 22). Esto implica que las variables seleccionadas puedan ser medidas de manera sistemática y constante, en al menos dos campañas anuales, y en una escala temporal de largo plazo. Asimismo, es esencial que estas variables sean estratégicas para la estimación de concentraciones contaminantes, y permitan evaluar los usos potenciales del agua, mediante el cálculo de índices simples.

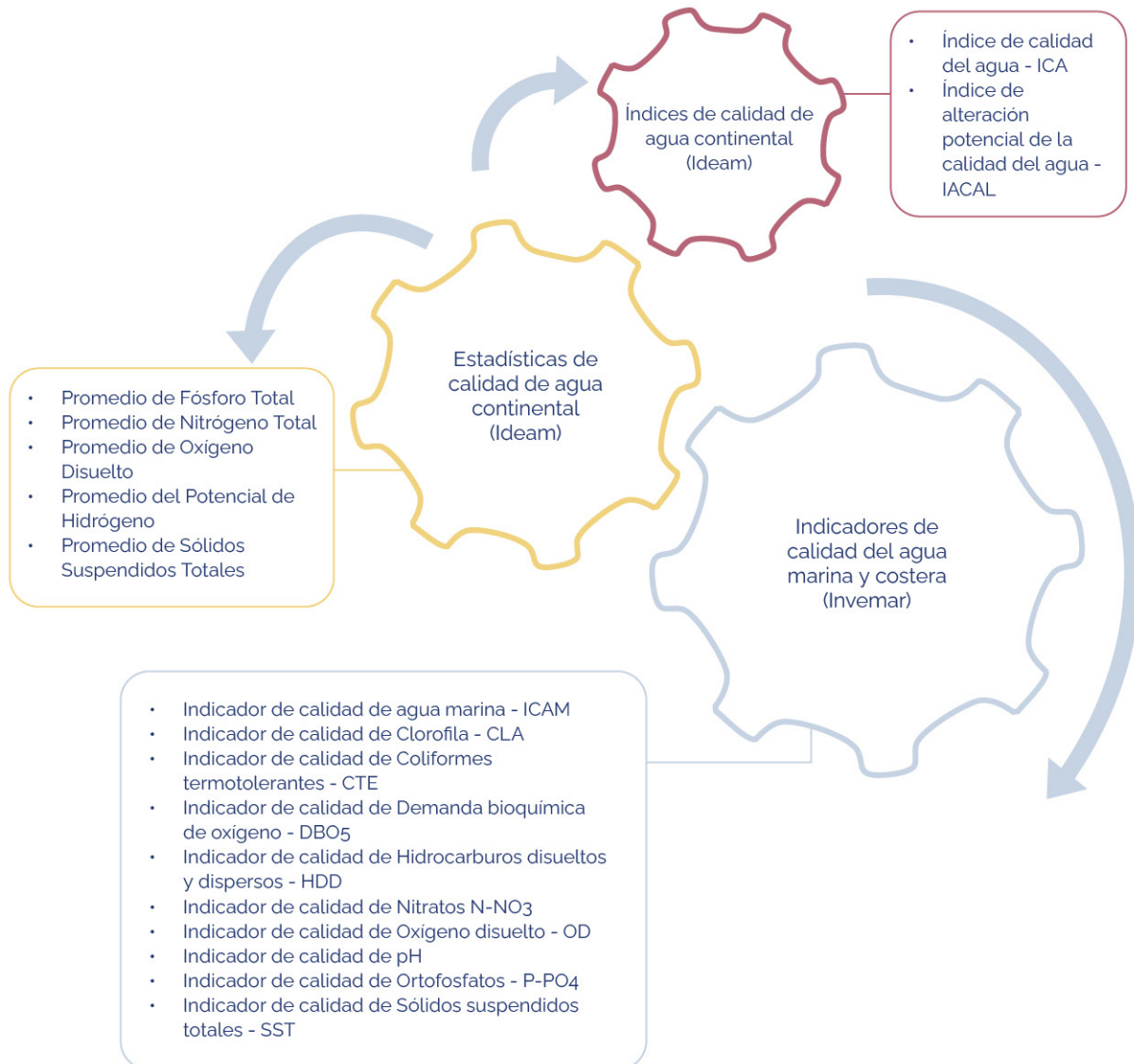
Figura 22. Propuesta de monitoreo por fenómeno de transformación de carga contaminante para establecer el estado de los ecosistemas acuáticos a escala nacional



A nivel nacional, el Invemar y el Ideam llevan a cabo el monitoreo de la calidad del agua, mediante el cálculo anual de diversos índices e indicadores (Figura 23). Para las aguas marinas y costeras, existen 138 estaciones de monitoreo ubicadas en los departamentos: Atlántico, Cauca, Chocó, Córdoba, La Guajira, Nariño, Sucre y Magdalena, siendo este último el que cuenta con el mayor número de estaciones. Para las aguas continentales, que incluyen

tanto cuerpos superficiales como subterráneos. Actualmente, el Ideam dispone de 1.988 estaciones convencionales activas, además de 606 estaciones automáticas con telemetría y 34 estaciones activas sin telemetría, distribuidas en todo el país. Esta red de monitoreo permite recopilar información clave para la evaluación de la calidad del agua y la gestión sostenible de los recursos hídricos en Colombia.

Figura 23. Estadísticas, índices e indicadores de monitoreo de la calidad del agua a nivel nacional



A pesar de los esfuerzos realizados en el monitoreo de la calidad del agua, es necesario complementar estos análisis con metodologías que amplíen la cobertura de los indicadores nacionales. Esto para hacer una evaluación continua de las presiones que afectan los ecosistemas acuáticos del país, que incorporen en el monitoreo a las comunidades

biológicas como un componente clave. Integrar estos elementos con los análisis físicos y químicos tradicionales no solo proporciona una visión más completa del estado del recurso hídrico para su aprovechamiento humano, sino que también contribuye a la conservación de la biodiversidad que depende de estos ecosistemas acuáticos.

Índices de contaminación

Los Índices de Contaminación (ICO) son herramientas que permiten evaluar el estado de los ecosistemas acuáticos a partir de un conjunto reducido de variables. Debido a su facilidad de cálculo, ya sea mediante métodos matemáticos o gráficos y a la economía de datos que requieren, estas herramientas representan una alternativa costo-efectiva para el monitoreo ambiental, permitiendo su aplicación por parte de autoridades nacionales y regionales encargadas de la gestión de los ecosistemas acuáticos (Ramírez *et al.*, 1997).

Las variables utilizadas en los ICO han sido seleccionadas por su relevancia ecológica dentro de la dinámica de los ecosistemas acuáticos. Estas incluyen conductividad, pH, sólidos suspendidos, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), dureza, fósforo total y coliformes totales. Su combinación en los distintos índices permite evaluar condiciones ambientales diferenciadas y proporcionar una visión integral del estado del agua (Ramírez *et al.*, 1997).

A continuación, se mencionan con sus características:

- Índice de Contaminación por Mineralización (Icomi): se basa en la conductividad, que refleja la concentración de sólidos disueltos, así como en la dureza y la alcalinidad, que representan la presencia de cationes (calcio y

magnesio) y aniones (carbonatos y bicarbonatos), respectivamente.

- Índice de Contaminación por Materia Orgánica (Icomo): emplea la demanda bioquímica de oxígeno, los coliformes totales y el porcentaje de saturación de oxígeno, variables que reflejan diferentes efectos de la contaminación orgánica en los ecosistemas acuáticos.
- Índice de Contaminación por Sólidos Suspendidos (Icosus): se basa, únicamente, en la concentración de sólidos suspendidos, un indicador clave en la evaluación de la turbidez y la sedimentación.
- Índice de Contaminación Trófica (Icotro): se determina, principalmente, por la concentración de fósforo total; un elemento fundamental en la productividad primaria y en la eutrofización de los cuerpos de agua.

La integración de estos índices con indicadores biológicos fortalece el análisis de la contaminación, al permitir no solo identificar sus fuentes, sino también evaluar sus efectos sobre la biota acuática. La concentración de nutrientes, especialmente el fósforo y sus derivados, puede generar alteraciones significativas en la densidad y composición de comunidades como bacterias, algas y plantas acuáticas. Por esta razón, su monitoreo es indis-

pensable para comprender la dinámica trófica de los ecosistemas. Además, variables complementarias como la clorofila a, la transparencia (medida

con disco de Secchi) y la concentración de oxígeno proporcionan información adicional sobre el estado trófico y la calidad del agua (Henao, 1987).

Monitoreo de contaminantes emergentes

Los contaminantes emergentes son sustancias químicas que, aunque no están reguladas de manera estricta, en la mayoría de las normativas ambientales, han sido identificadas en diversos ecosistemas acuáticos debido a su uso creciente y a los avances en técnicas de detección. Estas sustancias incluyen productos farmacéuticos, pesticidas, hormonas sintéticas, plastificantes y compuestos industriales, que pueden ingresar al medio acuático, a través de aguas residuales domésticas e industriales, escorrentía agrícola, lixiviados de vertederos y descargas de actividades ganaderas.

A pesar de encontrarse en concentraciones relativamente bajas, estos contaminantes pueden generar significativos efectos adversos en los ecosistemas acuáticos. Entre sus principales impactos se encuentran: la alteración endocrina en organismos acuáticos, la resistencia antimicrobiana, la toxicidad para diversas especies y la bioacumulación en la cadena trófica. Dado que muchos de estos compuestos son persistentes y no se eliminan completamente en las plantas de tratamiento de aguas residuales, su presencia en cuerpos de agua plantea

un desafío creciente para la gestión ambiental y la salud pública, pues asciende en la cadena alimentaria, alcanzando mayores concentraciones en los niveles superiores.

En el contexto del Promesa se han seleccionado tres categorías principales de contaminantes emergentes para su monitoreo: organofosforados, fármacos y hormonas, y ftalatos (ver Tabla 41). Los organofosforados incluyen pesticidas ampliamente utilizados en la agricultura, conocidos por su toxicidad para organismos acuáticos. Los fármacos y hormonas abarcan sustancias como la cafeína, el triclosán y diversas hormonas sintéticas, que pueden afectar la fisiología de peces y otros organismos acuáticos. Finalmente, los ftalatos son compuestos químicos sintéticos, utilizados como plastificantes en productos de consumo, pueden actuar como disruptores endocrinos y alterar el equilibrio ecológico. La Tabla 41 detalla los compuestos seleccionados en cada una de estas categorías, proporcionando una base para evaluar su presencia e impacto en los ecosistemas acuáticos monitoreados.

Tabla 41. Contaminantes emergentes propuestos

Organofosforados*	Farmacéuticos y hormonas**	Ftalatos***
Dichlorvos	4-terc-octilfenol	Dimetilftalato
Ethoprofos	Cafeína	Dietilftalato

Organofosforados*	Farmacéuticos y hormonas**	Ftalatos***
Forato	Fluoxetina	Bis (2metoxietil) ftalato
Diazinon	Gemfibrozil	Bis (2metil2pentil) ftalato
Disulfoton	Naproxeno	Dipentilftalato
Metil paration	Triclosán	Di-n-hexilftalato
Fention	Bisfenol	A Bis (2-n-butoxietil) ftalato
Clorpirifos	Primidona	Bis (2-etilhexil) ftalato
Merfos	Carbamazepina	Di-n-octilftalato
Estirifos	Trimethoprim	
Fensulfotion	Estrona	
Sulprofos	Progesterona	
AzinfosMetil		

Nota 1: *: Método 8141B EPA (1996). **: Metodología modificada de Gómez, Martínez-Bueno, Lacorte, Fernández-Alba y Agüera (2007). ***: Método 8061A EPA (2007).

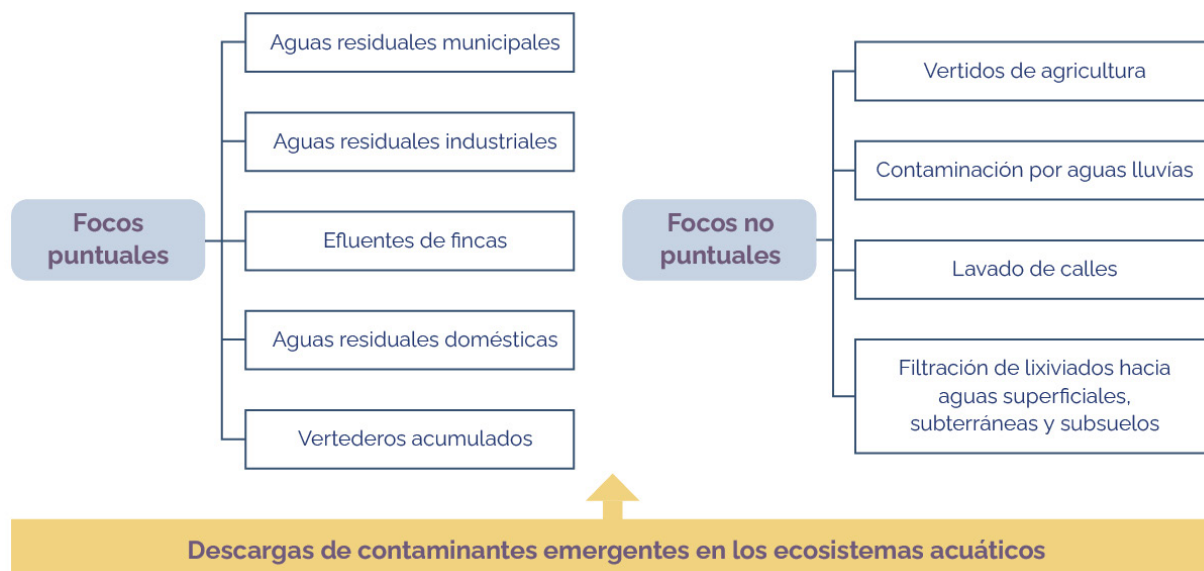
Nota 2: Límites de detección entre 0,1 – 500 µg L⁻¹.

Fuente: Tomado de Bedoya-Ríos (2018).

Si bien las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) representan los puntos más recomendados para el análisis inicial de estos contaminantes, es fundamental ampliar el monitoreo a otros componentes del ecosistema. Esto incluye

aguas superficiales, agua potable, biota acuática (principalmente peces) y sedimentos, permitiendo una evaluación más integral de los impactos y facilitando la implementación de estrategias de control y mitigación más efectivas (Figura 24).

Figura 24. Focos de contaminación emergente hacia los ecosistemas acuáticos



Fuente: Adaptado de Pal et al. (2010).

La selección de los compuestos a medir depende de la disponibilidad de equipos de análisis, como el cromatógrafo de gases acoplado a espectrometría de masas (GC-MS), una técnica que, aunque costosa, proporciona información clave para identificar fuentes de contaminación y mejorar los procesos de gestión ambiental. También se consideran la disponibilidad de estándares certificados para su análisis mediante GC-MS y la presencia de compuestos comúnmente utilizados en productos de consumo, incluidos fármacos y plastificantes comercializados en el sector minorista o comercio al por menor (IMS Health, 2017 citado en Bedoya-Ríos et al., 2018).

De manera complementaria, es importante llevar a cabo mediciones de caudal y parámetros básicos en campo, tales como pH, conductividad, temperatura, salinidad y oxígeno disuelto, dado que con esa información se pueden contextualizar los re-

sultados del análisis químico y evaluar las condiciones generales del ecosistema acuático que se esté estudiando.

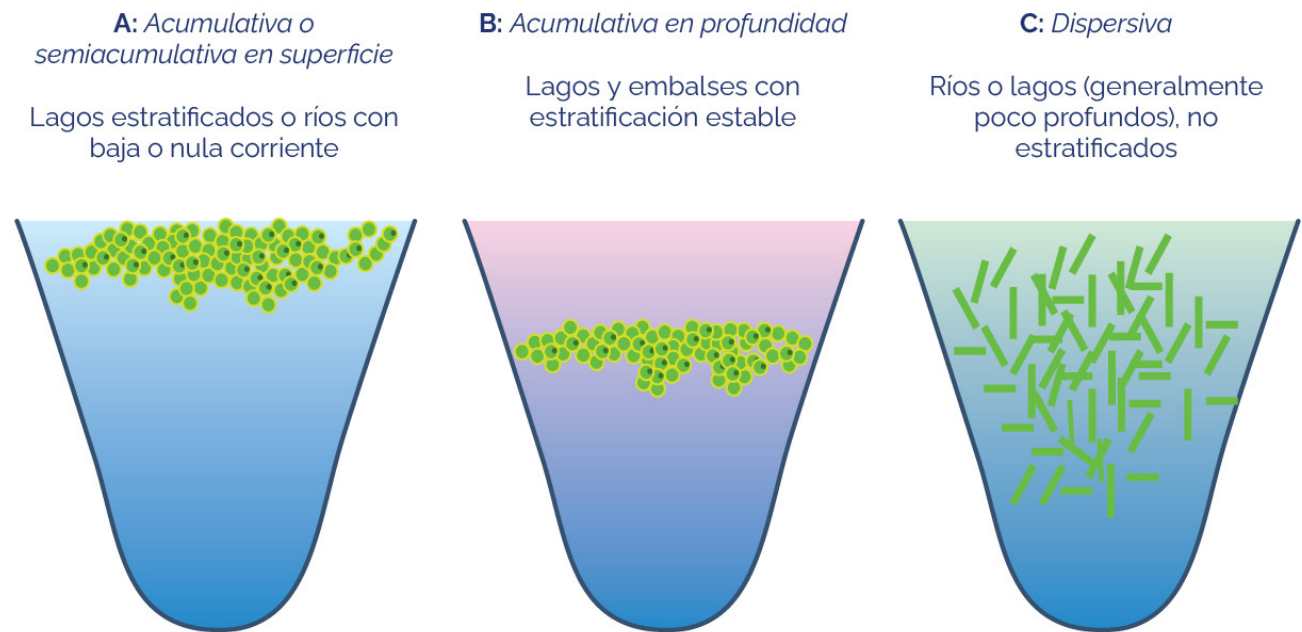
A partir de los resultados obtenidos, es fundamental calcular el coeficiente de peligrosidad (HQ, por su sigla en inglés de *Hazard Quotient*), ajustándolo según el medio en el que se haya realizado el monitoreo. Para este cálculo, es necesario disponer de información sobre las concentraciones previstas del contaminante sin efecto; es decir, los valores permitidos según la normatividad vigente, así como las concentraciones máximas y mínimas detectadas en el ecosistema. Además, es relevante establecer una valoración de toxicidad ecológicamente significativa, considerando efectos como mortalidad, inmovilización, reproducción o inhibición del crecimiento en los organismos que habitan los ecosistemas monitoreados.

Monitoreo de floraciones y clorofila a

Las actividades antrópicas han generado un desbalance de nutrientes en los ecosistemas acuáticos, lo que ha incrementado la incidencia de floraciones algales. El aumento de nitratos y fosfatos, en el agua, altera las condiciones del sistema y favorece el crecimiento descontrolado de microalgas y cianobacterias (Muciño, 2010). Factores como la disponibilidad de luz, la temperatura, la estabilidad térmica de la columna de agua, el pH, la disponi-

bilidad de nutrientes, la herbivoría y las condiciones tróficas influyen en la aparición y desarrollo de estas floraciones (Codd *et al.*, 2005; Aubriot *et al.*, 2009). Dependiendo de la especie dominante, los organismos pueden acumularse a distintas profundidades o dispersarse en toda la columna de agua, lo que determina diferentes tipos de floraciones (Figura 25).

Figura 25. Tipos de floraciones y su distribución en la columna de agua



Nota: Se indica en qué tipo de sistema y condición aparece cada forma de distribución.

A: acumulativa o semi-acumulativas en superficie, **B:** acumulativa en profundidad y **C:** dispersiva en toda la columna de agua. Las floraciones semi-acumulativas tienen el mismo aspecto que las acumulativas.

Fuente: Tomado de Unesco (2009).

Algunas especies responsables de las floraciones producen metabolitos secundarios bioactivos que pueden representar un riesgo para la fauna silvestre, el ganado y los seres humanos (Palacio *et al.*, 2015). En el caso de las cianobacterias, uno de los principales grupos responsables de floraciones en ecosistemas acuáticos, las toxinas generadas —conocidas como cianotoxinas— se clasifican según su modo de acción en neurotoxinas, hepatotoxinas, endotoxinas de lipopolisacáridos y dermatotoxinas (Bartram *et al.*, 1999; Ruibal *et al.*, 2009; Reichwaldt y Ghadouani, 2012). Entre estas, las más comunes y ampliamente estudiadas son las microcistinas y las saxitoxinas (Bartram *et al.*, 1999).

En ecosistemas de agua dulce, las cianobacterias son los principales organismos fitoplanctónicos que producen toxinas, mientras que en ambientes marinos y costeros pueden encontrarse otros grupos de fitoplancton tóxico, como dinoflagelados y diatomeas (Unesco, 2009). Por esta razón, el monitoreo de floraciones algales debe contemplar a toda la comunidad fitoplanctónica. La identificación y cuantificación de microalgas se realiza mediante técnicas de microscopía óptica y electrónica, mientras que la detección de toxinas requiere ensayos biológicos y cromatografía líquida de alta resolución (HPLC, por su sigla en inglés de

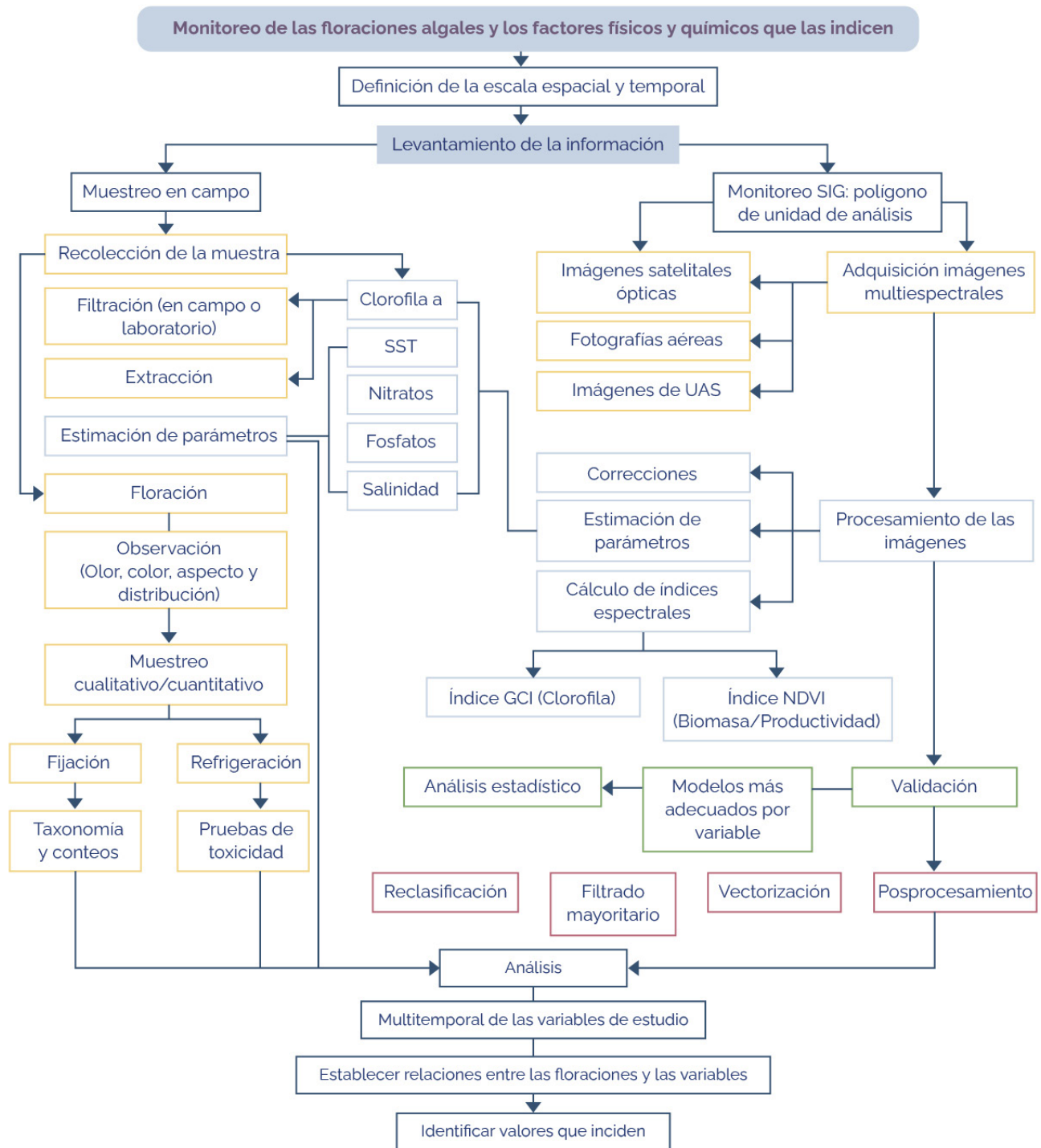
High-Performance Liquid Chromatography).

La cuantificación de clorofila a, un indicador fundamental del crecimiento del fitoplancton, puede realizarse mediante dos enfoques: a través de muestras de agua en campo y mediante el análisis de imágenes satelitales. Esta última técnica ha sido ampliamente utilizada en la evaluación de ecosistemas acuáticos y el seguimiento de procesos de eutrofización, con modelos como OC3M, el más empleado a nivel mundial para la estimación de este pigmento (Matthews *et al.* 2001; Zimba y Gitelson, 2006; Schalles, 2006; Ibrahim, Mabuchi y Murakami, 2009).

Para realizar un monitoreo integral de las floraciones algales es fundamental complementar la medición de clorofila a con otras variables, como la temperatura superficial, nitratos y fosfatos, sólidos suspendidos totales, turbidez, transparencia y salinidad en ecosistemas marinos. La integración de monitoreo en campo e imágenes satelitales permite una mejor identificación y seguimiento de este fenómeno, facilitando la toma de decisiones oportunas para la gestión de los ecosistemas acuáticos (ver Figura 26).



Figura 26. Ruta metodológica propuesta para el monitoreo de las floraciones algales y los factores que las indican en campo y a partir de imágenes satelitales para ecosistemas acuáticos continentales, marinos y costeros



Nota: Sólidos Suspendidos Totales (SST).

Finalmente, una vez se tengan los análisis de la información es importante, para los tomadores de decisión, entender los potenciales efectos que estas floraciones tienen sobre la salud de la pobla-

ción, así como su proceso de invasión y efecto sobre las comunidades naturales (Tabla 42). De esta manera se puede tomar acción inmediata que permitan manejar los eventos de forma asertiva.

Tabla 42. Relación entre los niveles de alerta, vigilancia y densidad de cianobacterias totales para agua destinada al consumo y contacto primario humano recomendados por la OMS

Nivel	Densidad (células/mL)	Riesgo	Recomendaciones
Consumo humano			
Vigilancia	0 - 2.000	No hay riesgo sobre la salud	Monitoreo semanal
Alerta I	2.000 - 100.000	Se presume un nivel de toxina superior al recomendado	<ul style="list-style-type: none"> • Cuantificación de toxinas • Acciones para reducir la llegada de cianobacterias a la planta de potabilización
Alerta II	> 100.000	Alta posibilidad de intoxicación	Medidas para remover toxinas en la planta de potabilización o cambio de la fuente de abastecimiento
Contacto primario			
Guía I	20.000 - 100.000	Riesgo bajo Efectos agudos adversos poco probables	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoreo semanal • Entrega de información a la comunidad y a las autoridades pertinentes

Nivel	Densidad (células/mL)	Riesgo	Recomendaciones
Guía II	> 100.000	<ul style="list-style-type: none"> • Efectos agudos adversos • Efectos crónicos potenciales 	Suspensión del contacto de animales y personal con el agua
	Millones (presencia de espumas)	Posibilidad de intoxicaciones severas al contacto	Prohibición del contacto de animales y personas con el agua

Fuente: Modificado de Chorus y Bartram (1999), Palacio (2015).

Monitoreo de plantas acuáticas y semiacuáticas

Las plantas acuáticas y semiacuáticas cumplen un papel importante en la dinámica de los ecosistemas acuáticos, ya que intervienen en el ciclado de nutrientes, la estabilización de sedimentos y la bioacumulación de contaminantes. Su distribución y abundancia están determinadas por factores ambientales como la topografía, la calidad del agua y la disponibilidad de nutrientes, lo que las convierte en indicadores de la salud del ecosistema.

El monitoreo de estas especies permite evaluar el impacto de los cambios ambientales y detectar alteraciones en la calidad del agua, a distintas escalas temporales. Su respuesta a la contaminación y otros factores de estrés es más lenta que la de las algas, pero más rápida, en comparación con peces

y macroinvertebrados, lo que facilita la identificación temprana. Además, su presencia disminuye con la altitud y su fácil identificación en campo permite realizar estudios con metodologías accesibles y replicables.

En la Tabla 43 se describe la metodología para el monitoreo de estos organismos en los ecosistemas acuáticos. Se incluyen variables como la composición de especies, la cobertura de plantas invasoras, la proporción de biotipos y el uso del NDVI para evaluar la biomasa y el vigor vegetal tanto en el ámbito nacional como regional. La periodicidad mínima recomendada para el monitoreo varía según la variable evaluada, con mediciones semestrales o anuales, dependiendo del nivel de análisis requerido.

Tabla 43. Metodología de monitoreo para el levantamiento de plantas acuáticas y semiacuáticas

Variable/atributo a monitorear	Escala de uso	Tipo de muestreo	Periodicidad mínima de monitoreo
Composición de especies de macrófitas acuáticas	Local, registrada por tramos en cada uno de los ecosistemas acuáticos priorizados para el monitoreo	Cualitativo, mediante un listado de especies	Semestral (en caso de ser posible, se sugieren monitoreos trimestrales)
Cobertura de plantas acuáticas con alto potencial de invasión		<ul style="list-style-type: none"> • Cualitativo, a partir de las especies registradas en los cuadrantes y transectos de análisis • Cuantitativo, a partir de la cobertura estimada por especie, y de las especies potencialmente invasoras 	
Proporción de grupos de macrófitas por biotipos		<ul style="list-style-type: none"> • Cualitativo, a partir de las especies registradas en los cuadrantes y transectos de análisis • Cuantitativo, a partir de la cobertura estimada por especie, y de los biotipos seleccionados, se calculará la proporción de cada biotipo en el ensamble 	
NDVI	Nacional y regional por medio de polígonos	<ul style="list-style-type: none"> • PPNA • Vigor o salud vegetal • Biomasa 	Anual

Índices de condición para otras comunidades hidrobiológicas

Las metodologías de monitoreo para las comunidades hidrobiológicas integran diversas técnicas y estrategias diseñadas para evaluar la respuesta de estos organismos a la carga contaminante en los ecosistemas acuáticos. Tanto el muestreo como el análisis de los datos son fundamentales para interpretar el estado de estos ecosistemas y determinar el impacto de las actividades antrópicas sobre su biodiversidad.

En este sentido, se han seleccionado una serie de indicadores e índices complementarios, los cuales permiten evaluar de manera integral los efectos de la contaminación. A continuación (ver Tabla 44), se presentan estos indicadores junto con las variables que los componen y sus respectivas definiciones, con el propósito de establecer herramientas efectivas para el seguimiento de la calidad ambiental en los ecosistemas acuáticos.

Tabla 44. Indicadores e índices para el análisis de comunidades hidrobiológicas propuestos para la implementación del Promsea

Indicador/Índice	Variabes/métricas que lo componen	Definición
Indicador de Condición Tendencia de áreas coralinas (ICTac)	Cobertura de coral duro vivo	Evalúa la condición general de integridad biótica, y por tanto de estado de conservación de áreas coralinas, y los cambios de dicha condición a través del tiempo. Esto por medio de la incorporación de información de cuatro variables que miden atributos estructurales y funcionales generales de este ecosistema en un solo valor numérico
	Cobertura de macroalgas frondosas y tapete algal	
	Biomasa de peces herbívoros: loros y cirujanos	
	Biomasa de peces carnívoros: pargos, chernas y meros	
Indicador de Condición Tendencia de pastos marinos ICTpm	Densidad de vástagos	Evalúa la condición general de integridad biótica y sus cambios a través del tiempo, a diferentes escalas espaciales, de las praderas de pastos marinos presentes en las áreas protegidas del Sistema de Áreas Marinas Protegidas (SAMP), sin que esto implique que no pueda ser utilizado en otras áreas fuera del subsistema
	Densidad de herbívoros	
	Densidad de carnívoros	
	Densidad de detritívoros / omnívoros	
	Afectación por <i>Labyrinthula spp</i>	

Indicador/Índice	Variables/métricas que lo componen	Definición
Indicador de Condición Tendencia de bosques de manglar ICTbm	Densidad de árboles	Evalúa la condición general de condición tendencia y sus cambios a través del tiempo, a diferentes escalas espaciales de bosques de manglar
	Área basal	
	Reclutamiento	
	Riqueza de aves residentes	
Índice de Integridad de Hábitat (IIH)	Profundidad relativa	Este índice mide la cantidad y calidad del hábitat para las comunidades bióticas (peces, macroinvertebrados, perifiton, vegetación riparia). La cantidad de hábitat se mide como el área disponible para cada comunidad y la calidad depende de los requerimientos de cada comunidad
	Ancho relativo	
	Variabilidad de la corriente	
	Saturación de oxígeno	
	Nitrógeno total	
	Fósforo total	
Índice de Estado Trófico (TSI, por su sigla en inglés de <i>Trophic State Index</i>)	Transparencia	Para el cálculo de este índice es muy importante el límite de detección del P y la cuantificación de la clorofila
	Clorofila a superficial	
	Fósforo total superficial	
Índice Trófico Planctónico (ITPm)	Abundancia relativa Desmidiáles	Propuesto por Barbe <i>et al.</i> (1990) y modificado por el mismo autor en Barbe <i>et al.</i> (2003), índice de plancton que no tiene en cuenta la biomasa de clorofila como su primera versión, y que amplía la escala de calidad de los grupos de algas de referencia, con el fin de dar mayor peso en el cálculo a las comunidades de algas más vinculadas a los procesos de eutrofización, que también son las más indeseables (cianobacterias, euglenios)
	Abundancia relativa Diatomeas	
	Abundancia relativa Crisófitas	
	Abundancia relativa <i>Diniphyceae</i> - <i>Cryptophyceae</i>	
	Abundancia relativa <i>Chlorophyceae</i> (exceptuando Desmidiáles)	
	Abundancia relativa Cianobacterias	
	Abundancia relativa Euglenios <i>Eugléniens</i>	

Indicador/Índice	VARIABLES/métricas que lo componen	Definición	
Indicadores basados en grupos tróficos para macroinvertebrados: Autotofía/Heterotofía	Abundancia de raspadores	Se utilizan las proporciones de la abundancia de los grupos funcionales alimenticios como indicadores de los atributos ecológicos de los ríos. Los valores corresponden a valores calculados para América del Norte, pero se han aplicado exitosamente en el trópico (Cummins <i>et al.</i> , 2005)	
	Abundancia de colectores totales		
Indicadores basados en grupos tróficos para macroinvertebrados: Materia orgánica	Abundancia de fragmentadores		
	Abundancia de colectores totales		
Indicadores basados en grupos tróficos para macroinvertebrados: los sedimentos en el bentos (suspendidos y almacenados)	Abundancia de filtradores		
	Abundancia de recolectores		
Indicadores basados en grupos tróficos para macroinvertebrados: estabilidad del sustrato	Abundancia filtradores y raspadores		
	Abundancia raspadores y fragmentadores		
Índice Ephemeroptera, Plecóptera y Trichoptera (EPT)	Número total de individuos de las familias <i>Ephemeroptera</i> , <i>Plecóptera</i> y <i>Trichoptera</i> en la muestra		En la medida en que el índice se acerca al 100 %, la calidad del agua es mejor. Por el contrario, porcentajes bajos señalan mala calidad Este índice debe ser aplicado solo para sistemas lóticos
	Número total de individuos de todas las familias en la muestra		
Índice de Integridad Biótica para Macroinvertebrados (IIB Macro)	Número total de taxones (TT)	La integridad biótica es la habilidad para soportar y mantener una comunidad de organismos balanceada, integrada y adaptable, con una composición de especies, una diversidad y una organización funcional comparables a aquellas de los hábitats naturales de una región. Este enfoque da una visión holística del ecosistema basada en las comunidades que lo habitan, en estos se tiene en cuenta aspectos estructurales y funcionales, así como las interacciones entre las	
	Número de taxones de <i>Trichoptera</i> (T)		
	Número de taxones de Díptera (D)		
	% de taxones <i>Ephemeroptera</i> (E)		
	% de taxones de <i>Ephemeroptera</i> , <i>Plecóptera</i> y <i>Trichoptera</i> (EPT)		
	% de Abundancia de Oligoquetos (O)		
	Número de taxones intolerantes (I)		

Indicador/Índice	Variables/métricas que lo componen	Definición
	<p>% de taxones tolerantes (Tol)</p> <hr/> <p>% de taxones recolectores (R)</p> <hr/> <p>Número de taxones filtradores (F)</p> <hr/> <p>Índice de Hilsenhoff (IH): n es el número de individuos de un taxón (se prefiere el nivel de familia)</p> <p>N es el número de individuos en toda la muestra</p> <p>El valor de tolerancia de los taxones puede consultarse en Universidad Nacional de Colombia y MAVDT (2008)</p>	<p>comunidades y con el medio ambiente</p> <p>Interpretación: baja, media y alta integridad biótica para cada comunidad que significa estado ecológico deficiente, medio y bueno para cada comunidad</p>
<p>Índice de Integridad Biótica perifiton (IIB peri)</p>	<p>Proporción de especies no diatomeas (ND)</p> <hr/> <p>% de diatomeas sensibles (DS)</p> <hr/> <p>% de diatomeas tolerantes (DT)</p> <hr/> <p>Diatomeas Eutrafénticas (DE)</p> <hr/> <p>Diatomeas Acidobiónticas (DA)</p> <hr/> <p>Diatomeas Alcalifíticas (DAK)</p> <hr/> <p>% Diatomeas Móviles (DM)</p> <hr/> <p>% Diatomeas Polisapróbicas (DP)</p> <hr/> <p>% Diatomeas Exigentes en Oxígeno (DO)</p> <hr/> <p>Concentración de clorofila a (Chl)</p>	

Indicador/Índice	Variables/métricas que lo componen	Definición
Índice de Integridad Biótica Vegetación de Ribera (IIB VegR)	# Especies riparias (EP)	
	# Especies acuáticas (EQ)	
	% de cobertura de especies anuales (EEAA)	
	% de cobertura de especies exóticas (EE)	
	% de cobertura de especies ruderales (ER)	
	% de cobertura de especies sensibles al disturbio (ES)	
	% de cobertura de especies tolerantes a la perturbación (ET)	
	Biomasa de la comunidad de vegetación ribereña	
Índice de Integridad Biótica Compuesto (IIB Comp)	IIB Macro	
	IIB peri	
	IIB VegR	
Índice de Integridad Biótica Peces (IIB Pec)	% de individuos nativos (N)	
	% de especies nativas (PN)	
	Cambio en el porcentaje de individuos migratorios (IM)	
	Cambio en el porcentaje de especies amenazadas (PA)	
	Porcentaje de reducción de tallas (RT)	
	Porcentaje de individuos carnívoros micrófagos (consumidores de invertebrados) (C)	

Indicador/Índice	Variables/métricas que lo componen	Definición
	Porcentaje de individuos carnívoros macrófagos (consumidores de otros peces) (CM)	
	Porcentaje de individuos con anomalías morfológicas (A)	
Índice de Calidad Ambiental de las Riberas (RQI, por su sigla de Riverbank Environmental Quality Index (RQI))	Continuidad longitudinal del bosque Anchura del espacio de vegetación asociada al río Composición y estructura de la vegetación riparia Regeneración natural de la vegetación arbórea y arbustiva	Valora la calidad ambiental de las riberas, incluyendo la condición del bosque ripario. La aplicación del índice está asociada, en términos generales, a la tipología del valle por la que discurre el cauce estudiado
Índice de Margalef	Número de especies Número total de individuos	Transforma el número de especies por muestra a una proporción a la cual las especies son añadidas por expansión de la muestra. Supone que hay una relación funcional entre el número de especies y el número total de individuos. El valor es 0 cuando existe una sola especie en la muestra
Índice de diversidad de Simpson	Frecuencia de microhábitats o individuos por especie	Manifiesta la probabilidad de que dos individuos tomados, al azar, de una muestra sean de diferentes especies. Está fuertemente influido por la importancia de las especies

Indicador/Índice	Variables/métricas que lo componen	Definición
	Total de datos	más dominantes. Los valores cercanos a 1 corresponden a alta diversidad y cercanos a 0 a baja diversidad
Índice de diversidad de Shannon-Weaner	Frecuencia de microhábitats o individuos por especie	Mide el contenido de información por individuo en muestras obtenidas al azar. Además, es una medida de la incertidumbre para predecir a qué especie pertenecerá un individuo elegido, al azar, de una muestra de S especies y N individuos
	Total de datos	
Índice de equitatividad de Pielou (J')	Índice de diversidad	Mide la proporción de la diversidad observada con relación a la máxima diversidad esperada
	Número de especies	

Monitoreo de variables geomorfológicas y suelos

El proceso de erosión no solo es característico de zonas de ladera, sino que también puede afectar ecosistemas acuáticos temporales, donde la pérdida de suelo impacta la dinámica del ecosistema. Su identificación y monitoreo se realizan mediante imágenes de sensores remotos, complementadas con observaciones en campo para determinar el tipo de erosión (hídrica o eólica), su clase (laminar, en surcos o en cárcavas) y su grado de severidad (ligero, moderado, severo o muy severo). Esta evaluación se basa en la estimación de la pérdida de los horizontes del suelo, proporcionando información clave para la gestión de suelos y la mitigación del proceso.

Por otro lado, la salinización del suelo se evalúa siguiendo la metodología establecida por el Grupo de Suelos y Tierras del Ideam, según el Protocolo para la Identificación y Evaluación de la Degradación de Suelos por Salinización. Este proceso de monitoreo incluye trabajo de campo y análisis de laboratorio para determinar la salinidad del suelo. Este proceso en el aumento de la concentración de sales en el suelo puede identificarse por el tipo (natural o antrópica), su clase (alcalina, salina, sódica, magnésica, calcárea o sulfatada ácida) y, por su grado de severidad (ligero, moderado, severo o muy severo); ello de acuerdo con la clasificación propuesta por el Ideam (Ideam, 2019c) (Ver detalles en la Tabla 45).

Tabla 45. Clasificación del grado de salinización propuesto

Rangos	Grados
RAS \geq 13 o CE \geq 16 dS/m	Muy severa
CE \geq 4, pH $<$ 4 y [SO ₄] \geq 0,05 %* o PSI \geq 15	
CE 8- 16 dS/m o [CaCO ₃ eq] \geq 10%	Severa
o PMgl \geq 40; PSI 10 – 15 %	
o [CaSO ₄ .2H ₂ O] \geq 15 %	
CE 4 - 8 dS/m o	Moderada
PMgl 30 - 40; PSI 7,5 - 10	
[CaCO ₃ eq] $<$ 10 % o [CaSO ₄ .2H ₂ O] $<$ 15 %	
CE 2 - 4 dS/m o pH \geq 7,4	Ligera
CE $<$ 2	Muy ligera

Fuente: Ideam (2019c).

El monitoreo de la fertilidad natural del suelo se lleva a cabo a través de análisis químicos en laboratorio, según lo establecido por el Igac (2014). Este análisis permite evaluar la calidad del suelo en los primeros 50 cm de profundidad, considerando variables como pH, saturación de aluminio (Sat. Al), capacidad de intercambio catiónico (CIC), saturación de bases (SB), bases totales (BT), contenido de carbono orgánico (C), fósforo (P) y potasio (K). Además, se incluyen factores que pueden afectar negativamente la fertilidad, como el contenido de sodio intercambiable (NaI) y la conductividad eléctrica (CE), los cuales pueden influir en la estructura y capacidad productiva del suelo.

Por otro lado, la conductividad hidráulica, que mide la capacidad del suelo para transmitir agua y oxígeno, a través de su perfil, se determina en laboratorio mediante pruebas en muestras alteradas, sometiéndolas a un flujo constante de agua. Este parámetro es clave para evaluar la permeabilidad del suelo y su capacidad para mantener condiciones óptimas para la biota del ecosistema.

En cuanto a la bioinfestación (presencia y propagación de microorganismos, hongos, bacterias, virus y nemátodos patógenos, que pueden alterar la estructura del suelo) en suelos de ecosistemas

acuáticos, el monitoreo inicialmente se enfoca en la identificación de microorganismos patógenos, priorizando el análisis de poblaciones de nemátodos y *Fusarium*, especialmente en zonas con antecedentes o reportes de presencia. Se espera que,

a medida que se obtenga un mayor conocimiento sobre la condición del suelo en los ecosistemas monitoreados, se amplíe la evaluación a otras especies de interés, según su relevancia ecológica y su impacto en la dinámica del ecosistema.

Plásticos y microplásticos

El monitoreo de plásticos, en ecosistemas acuáticos, debe realizarse en tres matrices ambientales clave: la columna de agua, los sedimentos y los contenidos estomacales de la fauna acuática. La metodología propuesta se basa en estudios realizados por el Invemar (2017-2020) en zonas marinas y costeras, pero puede ser ajustada para su aplicación en todos los ecosistemas acuáticos del país.

El proceso inicia con la selección de las zonas de monitoreo, para lo cual se priorizan los sitios de muestreo considerando criterios ambientales y socioeconómicos, tales como la presencia de ecosistemas estratégicos, la producción de residuos sólidos y la cobertura de servicios de aseo, la importancia turística, la geomorfología del área y, los antecedentes de estudios previos en la zona.

Una vez seleccionadas las áreas de muestreo, se emplean técnicas específicas para la recolección de plásticos en cada matriz. En agua, el muestreo se realiza mediante filtración con una red de plancton, utilizando cuadrantes definidos y un tiempo de esfuerzo estimado. Las muestras son almacenadas en recipientes herméticos, rotulados y preservadas con hipoclorito de sodio para eliminar materia orgánica. Para el caso de sedimentos, se establecen transectos donde se delimitan cuadrantes de 50 x 50 cm y, se colecta la capa superficial del sustrato (primeros 5 cm de profundidad), tamizando la muestra y almacenándola en bolsas herméticas. Finalmente, para el análisis de contenidos estomacales, se capturan peces con distintas artes de pesca, garantizando representatividad en el muestreo. En laboratorio, se identifican las especies, se

registran sus medidas morfométricas y se extrae su tracto digestivo para el análisis de plásticos ingeridos.

Los microplásticos detectados se clasifican según las categorías propuestas por Kovač *et al.* (2016) en fragmentos, filamentos, películas, espumas, gránulos y pellets, y se expresan en unidades de microplásticos/m³ en agua y, microplásticos/m² en sedimentos. Estos materiales han sido detectados en diversos niveles de la cadena trófica, desde el plancton hasta organismos de mayor tamaño como crustáceos, peces, reptiles, mamíferos y aves. Aunque los efectos de los macroplásticos son evidentes —provocan asfixia, deformaciones y alteraciones fisiológicas y comportamentales— los impactos de los microplásticos aún requieren mayor investigación. Para su identificación, se recomienda el uso de espectroscopía de infrarrojo (EIR), técnica que permite determinar la composición química del plástico y rastrear su origen, ya sea de fragmentos de botellas o bolsas, partículas presentes en productos de higiene personal como cremas dentales y exfoliantes, o de fuentes industriales (Ríos-Mendoza *et al.*, 2021).

En cuanto al muestreo de macroplásticos, es fundamental realizar su caracterización para identificar los tipos de artículos plásticos presentes en cada zona y su uso original. Según la clasificación de Hopewell *et al.* (2009) y Andrady (2011), los plásticos se dividen en tres categorías: productos para infraestructura (como tubos y cables, de alta durabilidad), productos de consumo (como muebles y accesorios de vehículos, de durabilidad media)

y productos de un solo uso o desechables (como botellas PET, bolsas y envases). Finalmente, es importante cruzar la información con estadísticas nacionales sobre la cobertura del servicio de aseo y la disposición final de residuos, con especial énfasis

en los cuerpos de agua naturales. Esto permitirá identificar las fuentes y causas reales de la contaminación por plásticos.

Monitoreo de la fragmentación en ecosistemas acuáticos

La fragmentación del hábitat es una de las principales amenazas para la biodiversidad, ya que genera el aislamiento de ecosistemas y dificulta la conectividad entre poblaciones de especies (Collinge, 1996). La pérdida de hábitat está directamente asociada a las actividades antrópicas, que modifican el territorio y conllevan a la reducción de especies, e incluso a su posible extinción.

En los ecosistemas acuáticos, la fragmentación de la vegetación en zonas ribereñas tiene un impacto significativo, pues esta vegetación influye directamente en la dinámica trófica, afectando tanto comunidades litorales como pelágicas. La conservación de las comunidades hidrobiológicas es esencial debido a su papel en la descomposición de la vegetación acuática y, en la provisión de alimento para otras especies (Meerhoff *et al.*, 2003). Sin embargo, evaluar el estado de conservación de la biodiversidad es un desafío, ya que muchas especies no han sido estudiadas ni catalogadas, y las metodologías de priorización de conservación varían ampliamente. Algunas propuestas utilizan el endemismo como criterio clave (Myers, 1988; Bibby *et al.*, 1993), mientras que otros enfoques consideran factores ecológicos y la viabilidad de conservación en humedales tropicales (Davies y Giesen, 1993).

Otro método ampliamente utilizado es el de Dinerstein *et al.* (1995), que permite evaluar el estado de conservación de las ecorregiones mediante variables como la pérdida y fragmentación del hábitat,

las tasas de deforestación y la presencia de áreas protegidas. En este contexto, la integración de datos de biodiversidad con información espacial es importante para identificar áreas prioritarias para la conservación. Para ello, se utilizan mapas de ecosistemas y coberturas terrestres, generados a partir de imágenes satelitales y datos vectoriales, complementados con información de fuentes secundarias.

Una estrategia fundamental para la conservación de ecosistemas acuáticos es el establecimiento de corredores biológicos, que faciliten la dispersión de especies y la conectividad entre áreas naturales aisladas (Rosenberg *et al.*, 1997). Estos corredores pueden diseñarse a nivel local, para conectar fragmentos dentro de un paisaje fisiográfico, o a escala regional o continental, asegurando la conectividad entre grandes regiones biogeográficas. La efectividad de estos corredores depende de factores como el tamaño del fragmento, su forma y su conectividad (McGarral y Marks, 1995). Áreas más extensas y con mayor conectividad favorecen el movimiento de especies, mientras que fragmentos pequeños y aislados limitan la dispersión y aumentan el riesgo de pérdida de biodiversidad.

En el caso de los ecosistemas acuáticos, el análisis de la cobertura terrestre circundante permite identificar la calidad del hábitat y su influencia en la distribución de las comunidades hidrobiológicas y la fauna asociada. La pérdida de cobertura boscosa reduce el aporte de materia orgánica a

los ambientes acuáticos (Rosas, 2001), afectando la productividad primaria y disminuyendo la disponibilidad de alimento para organismos heterótrofos que sustentan las cadenas tróficas (Allan y Castillo, 2007). Esta relación destaca la importancia de con-

servar la vegetación riparia y fortalecer la conectividad de los ecosistemas acuáticos para garantizar su funcionalidad y biodiversidad.

Propuesta metodológica para el monitoreo de la fragmentación

Las amenazas a la conectividad de los ecosistemas de agua dulce provienen de múltiples factores que operan a diferentes escalas espaciales y temporales. Por ello, las estrategias de mitigación y manejo deben ser diseñadas considerando las particularidades de cada bioma y cuenca (Amoros y Bournette, 2002). La conectividad hidrológica, definida como el transporte de materia, energía y organismos a través del agua dentro del ciclo hidrológico (Pringle, 2001; Freeman *et al.*, 2007) es fundamental para el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos. Su conservación requiere una gestión integrada de los ecosistemas terrestres y de agua dulce, con el objetivo de reducir alteraciones en la hidrología, geomorfología e integridad ecológica (Junk y Piedade, 2004).

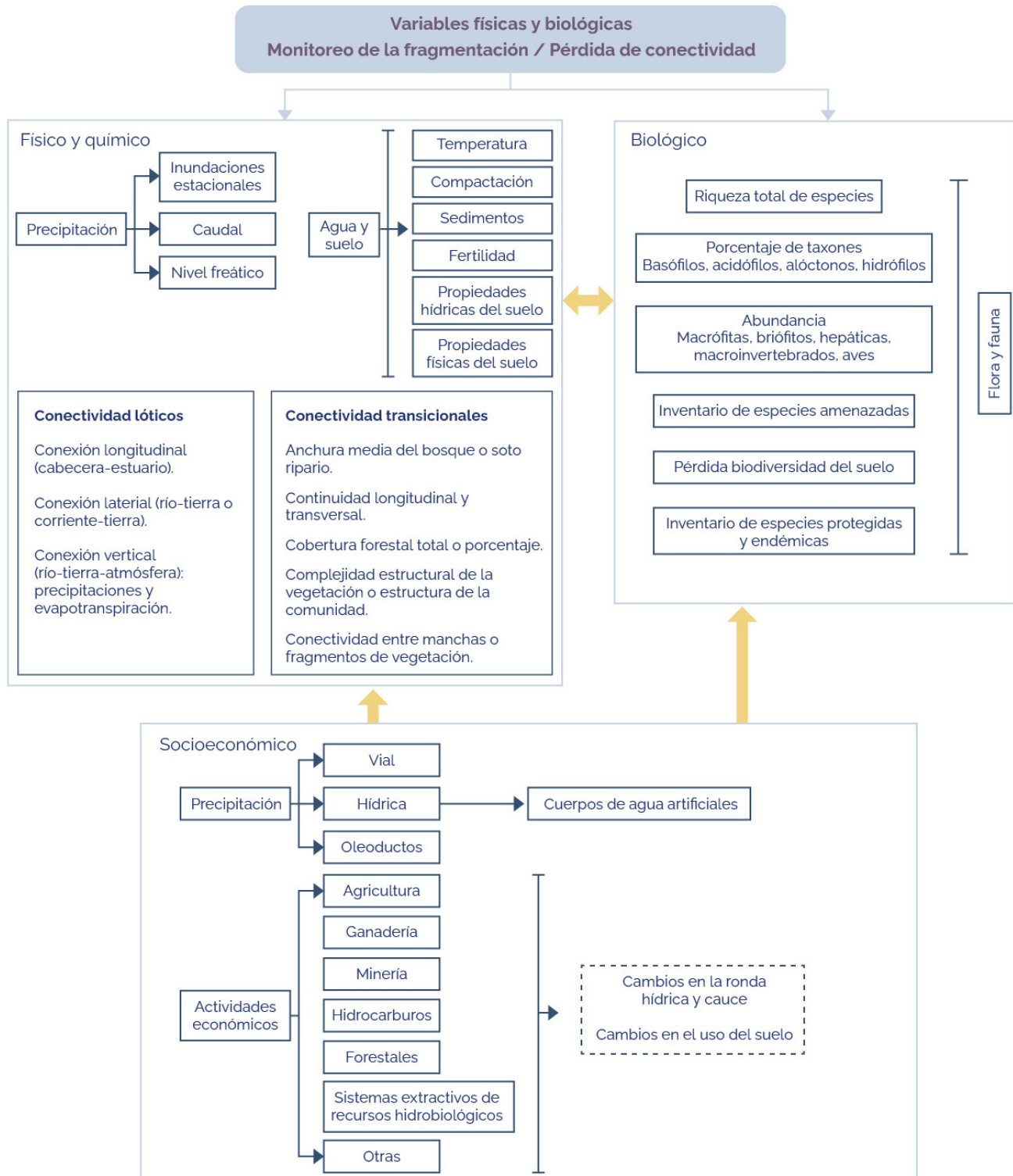
La sostenibilidad de la biodiversidad en los ecosistemas fluviales depende de la preservación del flujo natural de caudales, sedimentos y nutrientes. La mayoría de las especies acuáticas dependen de la conectividad entre diferentes secciones de los ríos o entre estos y sus planicies de inundación. Cuando la conectividad se ve interrumpida, se afectan los ciclos de vida, las rutas de migración y el acceso a hábitats críticos para muchas especies (González del Tánago *et al.*, 2006). Entre las principales actividades antrópicas que alteran esta conectividad se encuentran la construcción de represas y diques, que interrumpen la continuidad longitudinal de los ríos, modifican los regímenes de caudal y alteran la conectividad lateral, afectando procesos ecológicos esenciales como las inundaciones naturales

que facilitan el intercambio de materia y organismos entre hábitats (Standley *et al.* 2004).

Para evaluar la fragmentación y conectividad en los ecosistemas acuáticos, el Promsea ha priorizado una serie de variables e indicadores que permiten un análisis integral de estos procesos (ver en Figura 27). Se han seleccionado variables medibles mediante comparaciones multitemporales, que facilitan el análisis de los cambios en la conectividad a lo largo del tiempo; indicadores hidrológicos, relacionados con la calidad del agua y el flujo de caudales; y aspectos florísticos y faunísticos, como la presencia, diversidad, riqueza y abundancia de especies. A nivel espacial, se han incorporado metodologías de teledetección, que permiten evaluar las condiciones físicas del territorio y los efectos de la fragmentación a gran escala.

Adicionalmente, se han incluido variables socioeconómicas, ya que las presiones antrópicas, como proyectos de infraestructura vial, hídrica y oleoductos, así como ciertas actividades económicas, generan alteraciones en las rondas hídricas y cambios en el uso del suelo. Estas modificaciones pueden provocar procesos de fragmentación en los cauces, que afecta la funcionalidad de los ecosistemas acuáticos y comprometen su capacidad de mantener la biodiversidad y los servicios ecosistémicos asociados.

Figura 27. Propuesta de monitoreo por fenómeno de transformación de fragmentación para establecer el estado de los ecosistemas acuáticos a escala nacional



Debido a que existen diferentes metodologías propuestas para evaluar la fragmentación y/o pérdida de conectividad de los ecosistemas acuáticos, se dio prioridad a aquellas mediante las cuales se aplicaran índices o indicadores que pudieran calcularse a partir del uso de herramientas SIG. Por

ello, a continuación, se presentan los índices, más representativos, con sus ecuaciones y metodologías para obtener los resultados adecuados en cuanto a la evaluación de este fenómeno de transformación en ecosistemas acuáticos.

Índice de fragmentación

Para calcular el índice de fragmentación en el marco del Promsea, es fundamental contar con el mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia a escala 1 : 100.000 (Ideam *et al.*, 2017). Este insumo cartográfico es la base para identificar y clasificar oficialmente los ecosistemas acuáticos y evaluar su evolución en términos de conectividad y fragmentación.

El proceso inicia con la extracción de los ecosistemas acuáticos de interés, específicamente aquellos clasificados como ambientes lóticos y transicionales. Para ello, se utiliza la herramienta de recorte o extracción en un SIG, delimitando las áreas que serán objeto de análisis. Una vez definidos estos ambientes, se extraen los archivos vectoriales co-

rrespondientes a cada uno, en formato *shapefile* o *geodatabase*, para su procesamiento.

Posteriormente, se aplica el índice de fragmentación sobre las capas geográficas obtenidas, generando valores numéricos que reflejan el estado actual de la conectividad de los ecosistemas acuáticos. Estos valores serán comparados en análisis futuros con datos geoespaciales actualizados sobre superficies de agua y tipos de vegetación inundable, en intervalos de cinco a diez años (San Vicente, 2003).

La ecuación utilizada para calcular el índice de fragmentación es la siguiente:

$$F = \frac{\text{superficie total del hábitat}}{(\text{número de manchas} \times \text{dispersión de las manchas})}$$

Donde:

$$\text{Dispersión de las manchas (Rc)} = 2 \text{ dc } (\lambda/\pi)$$

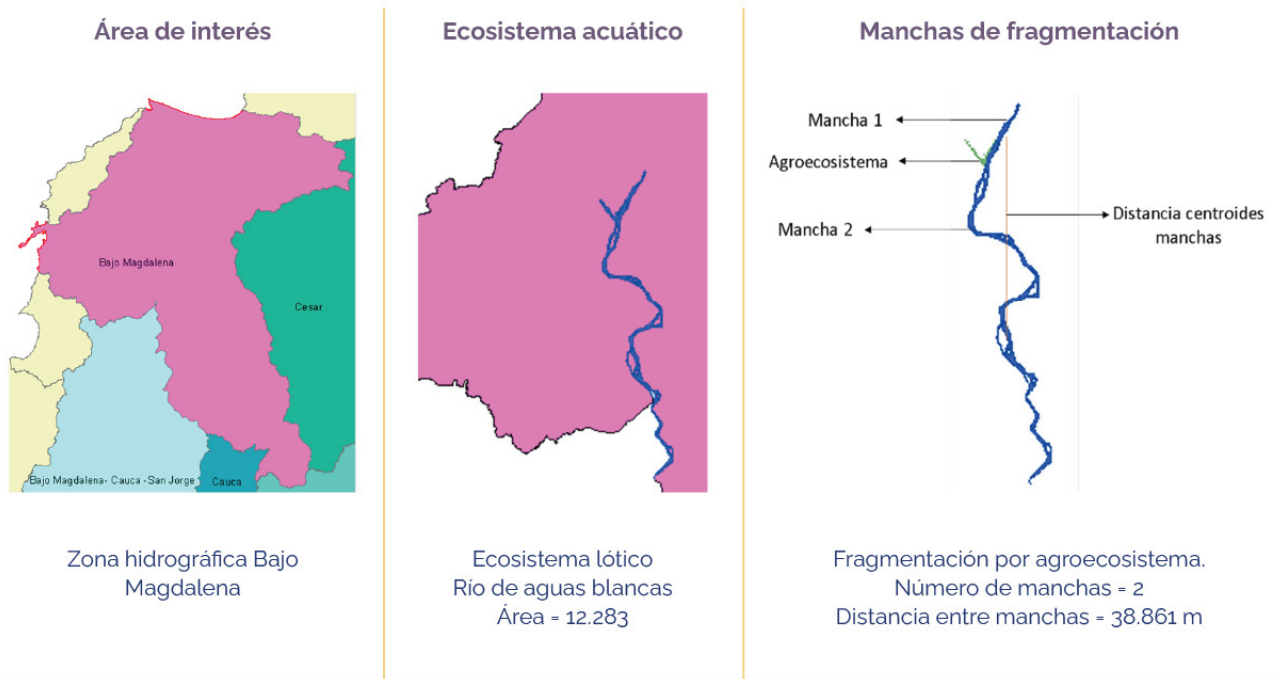
dc : distancia media desde una mancha (su centro o centroide) hasta la mancha más cercana.

λ : densidad media de manchas = (número de manchas/superficie total del área de estudio en ha.) x 100 = número de manchas por cada 100 ha.

A continuación, en la Figura 28 se presenta un ejemplo de las unidades cartográficas que deben

ser tomadas en cuenta para calcular el índice de fragmentación.

Figura 28. Ejemplo del cálculo del índice de fragmentación, a partir del mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia (Escala 1:100.000)



$$F = \text{superficie total del hábitat} / (\text{número de manchas} \times \text{dispersión de las manchas})$$

$$F = 12.283 / (2 \times 38.861) = 0.15$$

El índice de fragmentación no es directamente comparable entre diferentes tipos de ecosistemas acuáticos, ya que cada uno posee características propias, en términos de distribución espacial, geomorfología y procesos de formación. Por esta razón, su análisis debe realizarse dentro del mismo tipo de ambiente acuático, ya sea lótico, léntico, transicional o embalse, de acuerdo con la clasificación del MEC (Ideam *et al.*, 2020).

Para cada ambiente evaluado, la interpretación del índice se basa en su tendencia a incrementar

o disminuir. El índice propuesto emplea una escala inversamente proporcional al grado de fragmentación: un aumento en el valor del índice indica una reducción en la fragmentación, mientras que una disminución del índice refleja un incremento en la fragmentación del ecosistema. Esto se explica a partir de la fórmula del índice, en la que una mayor fragmentación se asocia con la reducción de la superficie total de las manchas, un aumento en el número de fragmentos y una mayor dispersión de estos (San Vicente, 2003).

Índice de continuidad de Vogelmann

Esta métrica indica qué tan continuo es un ecosistema, en este caso acuático, tomando como parámetros el área y el perímetro, y puede analizarse según dos ecuaciones. Este tipo de ecuaciones serán útiles para el análisis de fragmentación en ecosistemas transicionales.

Ecuación 1. Grado de fragmentación, se estima mediante la relación entre el área del ecosistema transicional y el área total.

$$F = \text{área de parches del ecosistema transicional (ha)} / \text{área total (ha)}$$

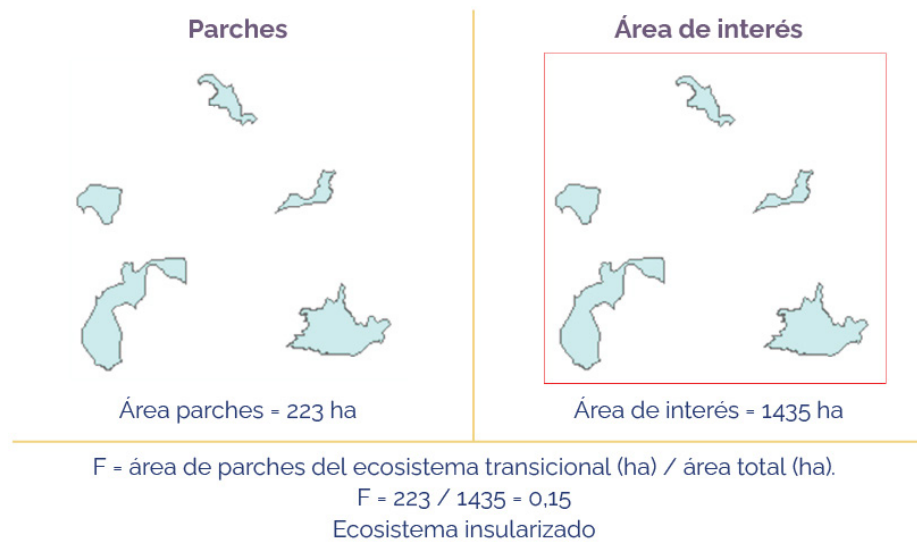
Los valores obtenidos para F varían entre 0 y 1, y se interpretan de la siguiente manera:

- F = 1: Ecosistema sin fragmentación
- $1 > F \geq 0,7$: Fragmentación moderada
- $0,7 > F \geq 0,5$: Altamente fragmentado
- $F < 0,5$: Insularizado

Valores altos de F indican una mayor continuidad del ecosistema transicional, mientras que valores bajos reflejan un alto nivel de fragmentación y discontinuidad de los parches de vegetación (Vogelmann, 1995). Un ejemplo de este cálculo se presenta en la Figura 29, donde se analiza la fragmentación de los ecosistemas de arbustales

inundables, según el MEC (Ideam *et al.*, 2017). Los resultados evidencian que estos ecosistemas se encuentran en un estado de insularización; es decir, con una distribución fragmentada que limita la conectividad ecológica y la funcionalidad del ecosistema.

Figura 29. Ejemplo de proceso de fragmentación en ecosistemas de arbustales inundables



Ecuación 2. Índice de continuidad espacial, se usa para evaluar la continuidad espacial, como indicador de fragmentación.

$$FCI = \ln (\Sigma A / \Sigma P)$$

Donde:

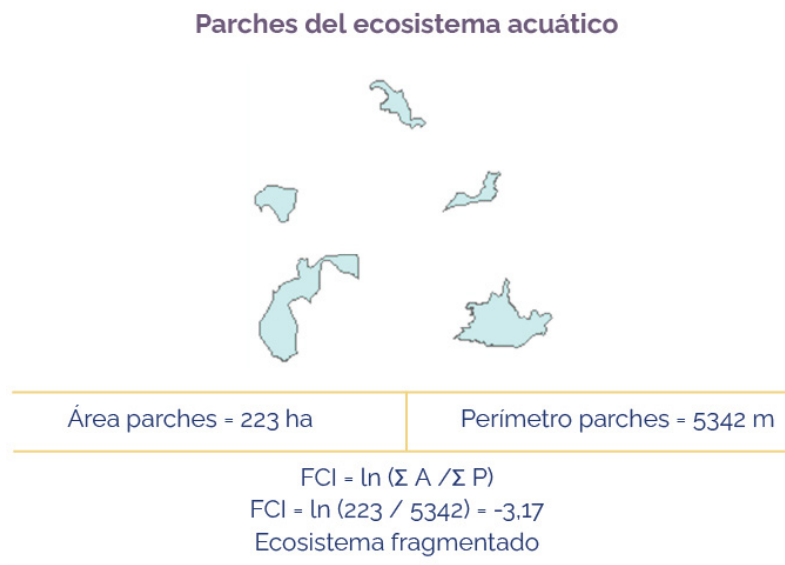
- FCI : Índice de Continuidad Espacial de Vogelmann
- ΣA : Área total de parches del ecosistema acuático
- ΣP : Perímetro total de parches del ecosistema acuático

Los valores máximos del grado de fragmentación reflejan una mayor continuidad del ecosistema, mientras que los valores mínimos indican una mayor fragmentación y discontinuidad de los parches que lo componen. Cuando estos valores se comparan dentro de una escala logarítmica natural, aquellos menores a cero son indicativos de una mayor conectividad ecosistémica (Vogelmann, 1995).

de la continuidad espacial utilizando polígonos delimitados mediante herramientas SIG. Este análisis puede realizarse a partir del mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia (Ideam *et al.*, 2017) o mediante la digitalización de áreas, a partir de imágenes satelitales. Ambas metodologías permiten evaluar la conectividad y el estado de fragmentación de los ecosistemas acuáticos, y facilita la identificación de áreas prioritarias para su conservación y restauración.

En la Figura 30, se presenta un ejemplo del cálculo

Figura 30. Ejemplo para calcular el FCI



Índice de Densidad (PD)

Expresa el número de parches con respecto a una unidad de área. A mayor densidad de parches, una clase o paisaje es más heterogénea; por lo tanto,

más fragmentada. Se multiplica por 100 para obtener una superficie de 100 hectáreas de referencia (Ordóñez y González, 2016).

$$PD = \frac{ni}{A} * 100$$

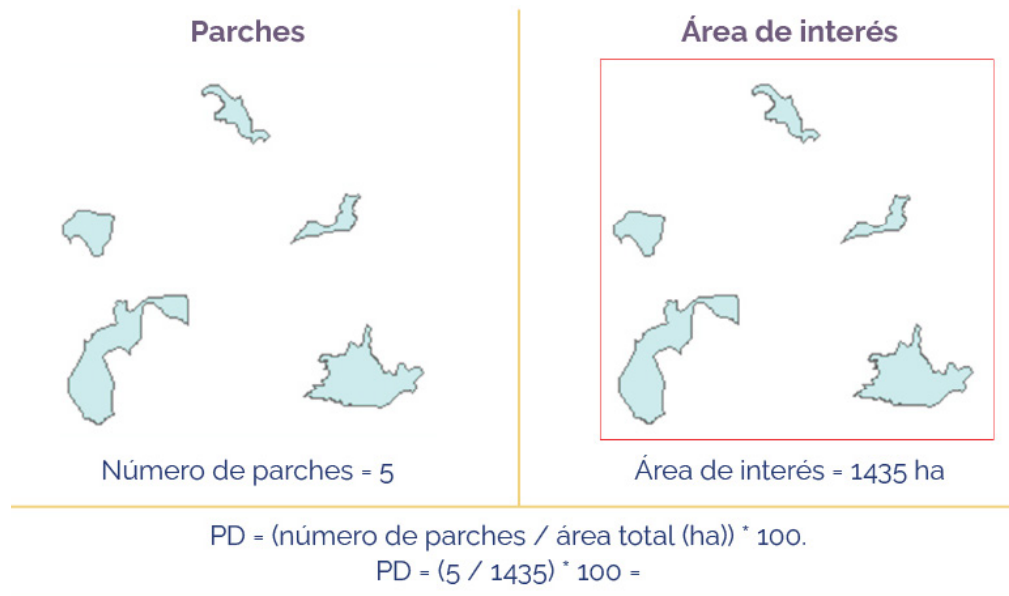
Donde:

Ni: Número de parches en el paisaje que corresponden a la clase i

A: Área total del paisaje

En la Figura 31 se representa un ejemplo de cómo se calcula el PD de los parches de fragmentación.

Figura 31. Ejemplo del cálculo del PD



Modelo HEC-RAS

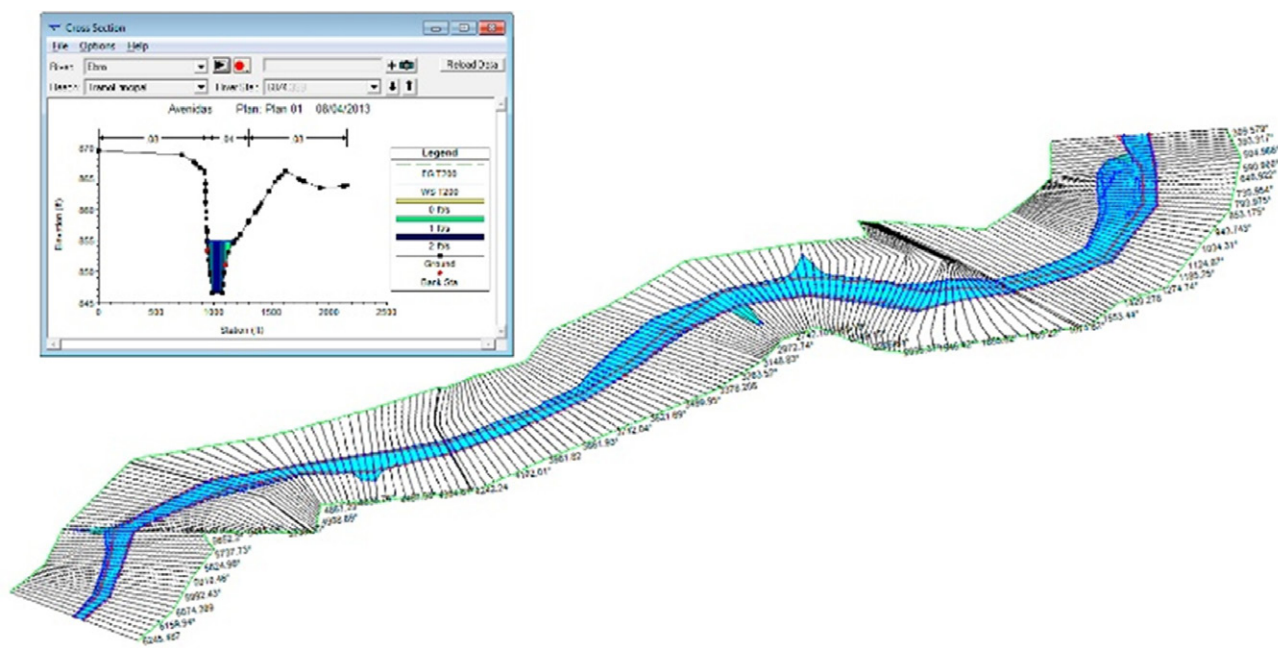
El *Hydrologic Engineering Center's River Analysis System* o Modelo HEC-RAS (por la sigla en inglés) permite calcular los niveles de la superficie del agua bajo distintas condiciones de flujo, incluyendo flujo permanente, no permanente o gradualmente variado, en canales naturales o artificiales. Mediante este proceso de modelación hidrológica, es posible evaluar la pérdida de conectividad entre ecosistemas acuáticos, como la desconexión entre un ecosistema lótico y uno transicional.

Para realizar el modelamiento, es necesario definir secciones transversales del río o canal, que incluyan tanto el canal principal como la planicie de inundación. Además, debe considerarse una serie de suposiciones hidrodinámicas, establecidas por Fread (1997) y Barkau (1985), que constituyen la base del

procedimiento de solución para flujo no permanente en HEC-RAS. Este modelo también permite definir áreas de almacenamiento, lo que amplía su aplicabilidad en la simulación de dinámicas hidrológicas (De León Otero y Llain Torrado, 2017).

Para realizar este análisis a nivel espacial, se dispone de la extensión HEC-GeoRAS. Esta es una herramienta que facilita el procesamiento de datos geoespaciales en software SIG (ver Figura 32). Esta extensión permite la preparación de datos geométricos, su importación en HEC-RAS y la posterior exportación de los resultados, facilitando la generación de cartografía de elevaciones del nivel del agua y proporciona una base precisa para evaluar la conectividad y fragmentación de los ecosistemas acuáticos (Cursosgis, s.f.).

Figura 32. Modelación hidráulica en HEC-GeoRAS para analizar la dinámica de cauce



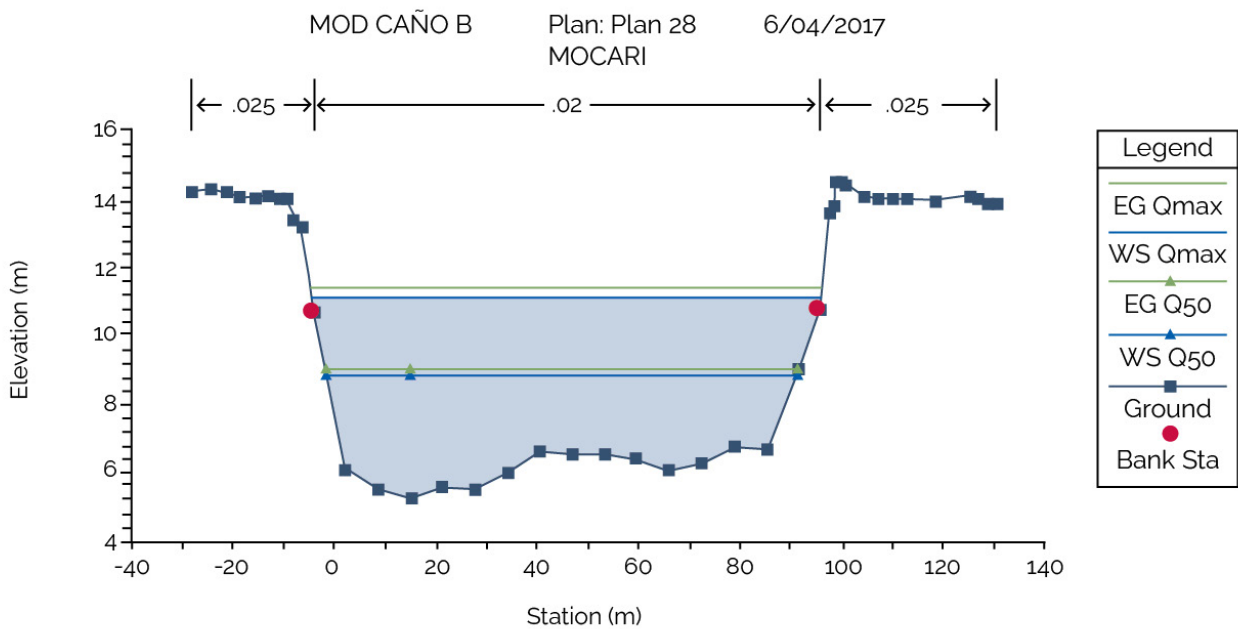
Fuente: Tomado de Cursosgis (s.f.).

Un ejemplo del uso del modelo HEC-RAS se presenta en la Figura 33, donde se analiza la sección transversal del río Sinú, según la investigación de De León Otero y Llain Torrado (2017). En este estudio, los autores concluyeron que la degradación del lecho del río Sinú ha provocado una disminución progresiva en la derivación de caudal hacia el caño Bugre.

la fragmentación de los ecosistemas acuáticos, ya que estos análisis no solo permiten determinar las variaciones en la conectividad del flujo hídrico, sino que también facilitan la comparación de condiciones entre diferentes periodos de tiempo. De esta manera, la modelación se convierte en una herramienta fundamental para la identificación de impactos hidrológicos y la formulación de estrategias de conservación y restauración.

Este caso resalta la importancia de incluir procesos de modelación hidrológica en la evaluación de

Figura 33. Ejemplo de análisis de secciones transversales del ecosistema de río con el modelo HEC-RAS



Fuente: Tomado de De León Otero y Llain Torrado (2017).

Índices de migraciones de especies basados en modelos de desplazamiento

Cuando ocurre un proceso de fragmentación en los ecosistemas, en algunos casos, se generan corredores biológicos que actúan como conexiones entre los parches resultantes de la transformación del paisaje. Estos corredores pueden presentar

formas y configuraciones variables, aunque suelen ser predominantemente alargados, y su principal función es facilitar el desplazamiento de las especies y mantener la conectividad ecológica (Fahrig, 2003).

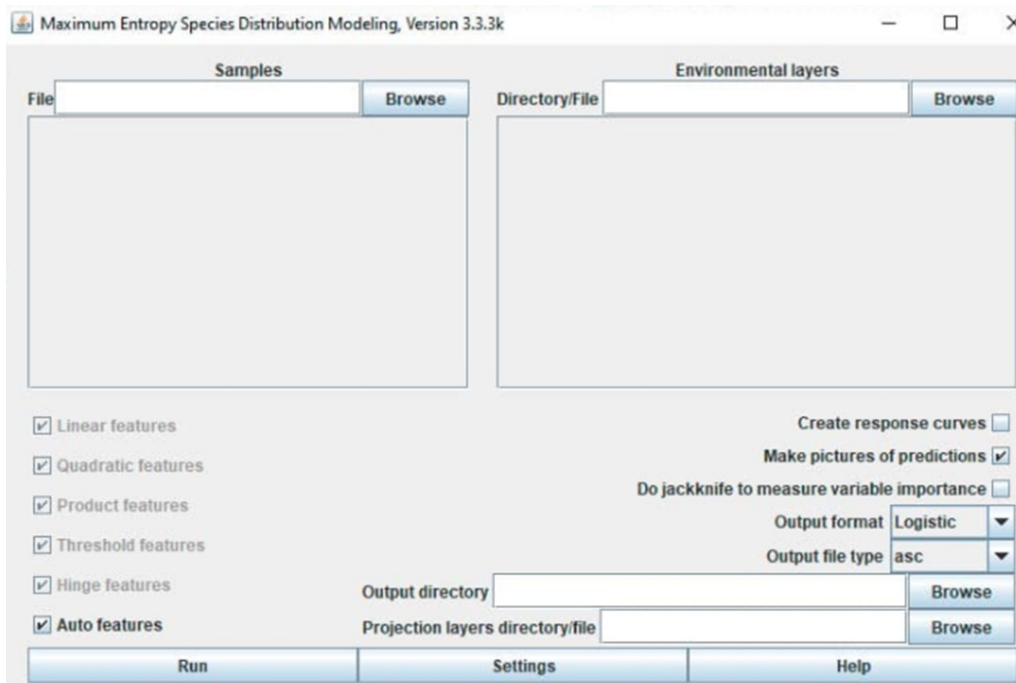
Para analizar el desplazamiento de las especies, en función del paisaje, se puede emplear el modelo Dispersa (Rosell *et al.*, 2003), el cual correlaciona la presencia y abundancia de especies (aves, mamíferos, peces y anfibios) con elementos clave del paisaje como son: continuidad de ecosistemas terrestres, presencia de valles y crestas y, proximidad a ecosistemas acuáticos. La combinación de estos tres elementos, mediante herramientas SIG, permite calcular un índice de resistencia a la dispersión, clasificando el territorio según su capacidad para facilitar o dificultar el desplazamiento de especies:

- Continuidad de ecosistemas terrestres, como bosques y arbustales, que facilitan la dispersión de la fauna.
- Presencia de valles y crestas, que pueden actuar como corredores naturales de desplazamiento.
- Proximidad a ecosistemas acuáticos, los

cuales concentran una alta diversidad de fauna y funcionan como ejes de canalización biológica.

Otra herramienta útil en estudios de conservación es el software MaxEnt, diseñado para predecir la distribución de especies, a partir de datos de presencia. Este modelo requiere datos de distribución de especies, que pueden obtenerse de plataformas como el Sistema Global de Información sobre Biodiversidad (GBIF, por su sigla en inglés de *Global Biodiversity Information Facility*), y datos climáticos, descargables de WorldClim. Allí se encuentran variables disponibles en distintas resoluciones espaciales, desde 30 segundos (~1 km²) hasta 10 minutos (~340 km²). Los archivos ZIP descargados contienen 12 archivos GEOTIFF, correspondientes a las condiciones climáticas de cada mes del año. Una vez incorporados estos datos en el software MaxEnt, se pueden generar modelos predictivos de distribución de especies, permitiendo evaluar su posible presencia, en diferentes escenarios ambientales (ver Figura 34).

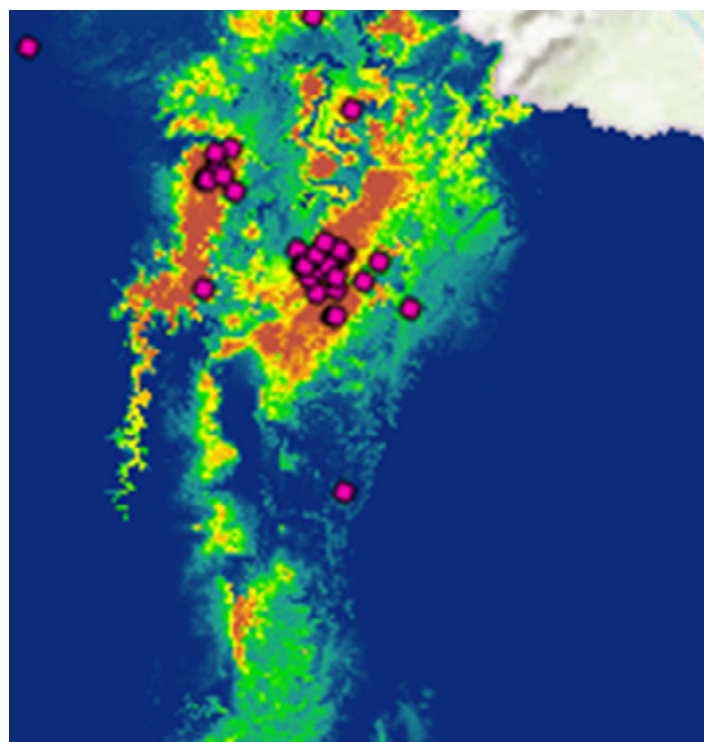
Figura 34. Interfaz del software MaxEnt



Al finalizar el proceso, se evalúa la correspondencia entre la distribución modelada y los registros que se tengan de las diferentes especies, según datos

tomados en campo preferiblemente. En la Figura 35 se muestra un ejemplo del modelo resultante, usando el software **MaxEnt**.

Figura 35. Ejemplo de modelo de distribución de especies generado en el software **MaxEnt**



Sin embargo, dado que estos análisis se basan en coordenadas extraídas de bases de datos, es necesario complementar el estudio con herramientas adicionales que permitan asociar esta información con los procesos de fragmentación y pérdida de conectividad en los ecosistemas acuáticos. Para ello, se requieren software especializados que faciliten la evaluación de la fragmentación del territorio, la conectividad entre espacios y la distribución de las unidades del paisaje. Algunas de herramientas pueden ser:

- Linkage Mapper que permite hacer análisis territoriales basados en conectividad de espacios naturales mediante corredores eco-

lógicos con el fin de combinar parches territoriales susceptibles de ser empleados por las especies (<https://circuitscape.org/linkagemapper/>).

- Corridor Designer es una extensión compatible con ArcGIS que permite diseñar y evaluar corredores biológicos, para facilitar o mejorar la conservación de las especies de interés (<http://corridordesign.org/>).

- Fragstats calcula diferentes métricas del paisaje (<https://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/>).

Indicadores de fragmentación causada por obras de infraestructura

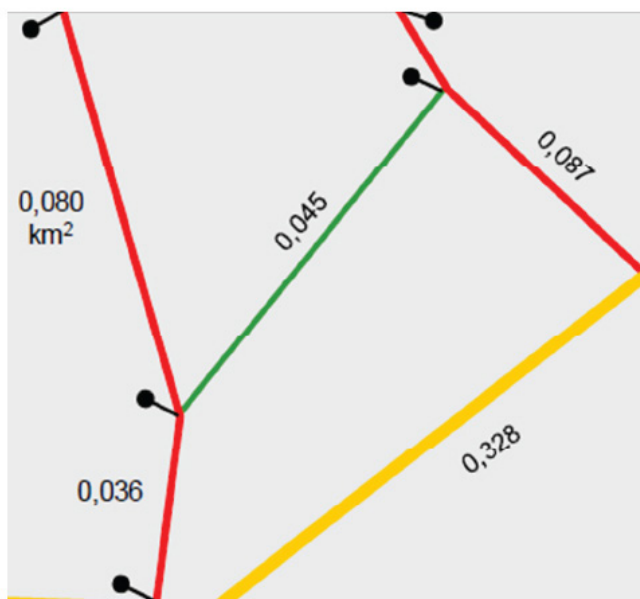
La fragmentación generada por obras de infraestructura vial, hídrica u oleoductos, entre otros, determina efectos particulares sobre los hábitats tanto en las fases iniciales de construcción, como en las fases de explotación de los recursos biológicos e hídricos. A pesar de tratarse de elementos lineales que ocupan una pequeña porción de los ecosistemas, soportan una alta intensidad de uso, por lo que cambian la extensión y configuración espacial de los hábitats, y a la vez generan la formación de nuevos hábitats en los alrededores de las infraestructuras. De esta forma se altera la composición de la biocenosis, la dinámica de los hábitats y los procesos ecosistémicos en las superficies de agua de tipo lótico, léntico y transicional (Sastre *et al.* 2002).

Por lo anterior, para evaluar la afectación de los hábitats y ecosistemas causada por la construcción

de infraestructuras, existen diferentes indicadores, que pueden ser calculados a partir del uso de insumos geográficos de tipo vectorial o ráster. Estos indicadores están categorizados así:

- Medidas sobre las infraestructuras: corresponden al cálculo de las propiedades e infraestructuras, o de estas en relación con las áreas de interés, aportando información de forma indirecta sobre los efectos ecológicos de la fragmentación (Girvetz *et al.*, 2008). Para este caso, se calcula la superficie ocupada por la infraestructura y áreas adyacentes, calculada en unidad de medida de superficie (ha, m², km², etc.). Una vez se tiene el valor del área ocupada, se calcula el indicador dividiendo el área total ocupada por infraestructura entre el área total del ecosistema y, se multiplica por 100 para tener un valor porcentual (ver Figura 36).

Figura 36. Ejemplo del cálculo de la superficie ocupada por la infraestructura



Área total ecosistema = 112 km²

Superficie ocupada por infraestructura = 0,080 + 0,045 + 0,087 + 0,036 + 0,328 = 0,576 km²

Valor del indicador = (0,576 km² / 112 km²) * 100 = 0,51%.

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2010).

- Medidas sobre propiedades topológicas: consideran patrones actuales del paisaje, generadas o no por los procesos de fragmentación (Moser *et al.*, 2007; Townsend *et al.*, 2009).

Se enfocan en medir la forma de los parches de hábitat, a partir de la relación entre el perímetro y el área, para lo cual se usa la ecuación para calcular el perímetro normalizado (Pn):

$$Pn = P/P'$$

Donde:

P: corresponde al perímetro del parche

P': corresponde al perímetro de un parche circular dentro del mismo ecosistema fragmentado.

Así, se evalúa la forma de los parches, ya que es un aspecto relacionado con los cambios en el efecto de borde; cuando la forma es cuadrada o circular tendrá menor margen que un parche alargado o irregular, por lo que, habrá menos probabilidad de sensibilidad a las perturbaciones.

- Medidas basadas en conectividad: el análisis de la fragmentación se centra en el componente funcional denominado pérdida de conectividad (Marull *et al.*, 2007; Jaeger, 2000). Para esto, se plantea el índice de distancia que mide la conectividad estructural, basado en la teoría de metapoblaciones. Se puede calcular con el inverso de la distancia:

$$C = (1/(2 * C_{max})) * \sum (A_i * D_i)^{-1}$$

Donde:

C: es la conectividad del parche o área de interés

A_i: es el área de los demás parches aledaños

D_i: es la distancia de los parches al parche de interés

C_{max}: es el factor de normalización, que es el valor máximo de la distancia de cada parche al parche de interés.

Métodos propuestos para el análisis de fragmentación en campo, a partir de variables de suelos

Por otro lado, debido a que las variables, índices e indicadores, mencionados anteriormente, son calculados mediante el análisis espacial, es importante hacer una complementación con el estudio de variables de los suelos en campo. De esta manera, los principales métodos que dan respuesta a la ocurrencia de la fragmentación en ecosistemas acuáticos incluyen:

- Análisis de las propiedades hídricas del suelo: dentro de las propiedades, ha de incluirse la capacidad de retención de humedad, que se define como el agua disponible en el suelo para las plantas y se estima en laboratorio, a partir de la estimación de la Capacidad de Campo (CC) y del Punto de Marchitez Permanente (PMP) usando ollas a presión y

sometiendo muestras indisturbadas de suelo a diferentes presiones, entre CC y PMP, generalmente las presiones usadas son de 1,5 y 15 bares. También se recomienda incluir la medición de la infiltración, que está definida como el proceso por el cual el agua penetra desde la superficie del suelo hacia la profundidad del suelo. En campo es medida mediante el uso de anillos e indica la cantidad máxima de agua que puede absorber un suelo, valor que es variable en el tiempo en función de: la humedad del suelo, el material del suelo, las texturas de sus diferentes horizontes y la cantidad y la distribución de los poros del suelo.

- Otra de las más comunes es la conductividad hidráulica, que describe la capacidad de un suelo para transmitir agua e indirectamente

oxígeno hacia el perfil del suelo. Esta prueba se realiza, en laboratorio, utilizando muestras alteradas, someténdolas a un flujo constante de agua que atraviesa las muestras de suelo.

- Compactación: se estima mediante dos indicadores, la penetrabilidad y el cambio de porosidad total del suelo. La penetrabilidad se mide con un penetrómetro, que indica la resistencia del suelo a ser penetrado. La porosidad se estima mediante la relación entre las densidades real y total del suelo.

- Consistencia del suelo: Se estima de dos formas: en campo, según el contenido de humedad y, en laboratorio, a partir de los límites de Atterberg, también conocidos como límites de plasticidad o límites de consistencia³.

Monitoreo del cambio climático en ecosistemas acuáticos

En las últimas décadas, el cambio climático ha sido identificado como una de las principales amenazas para los ecosistemas, incluidos los ecosistemas acuáticos. El aumento en la concentración de GEI en la atmósfera ha intensificado fenómenos como huracanes, sequías e inundaciones, afectando los patrones climáticos a nivel global (Ghosh *et al.*, 2016). Estos cambios inciden directamente sobre la disponibilidad y calidad del agua, la biodiversidad y los procesos ecológicos que sustentan los ecosistemas acuáticos.

El impacto del cambio climático en estos ecosistemas se ve reflejado en su interacción con otros factores de presión como el cambio hidromorfológico, la eutrofización, la acidificación y la contaminación por sustancias tóxicas (Kernan *et al.*, 2010). Estos procesos alteran la fisiología, comportamiento, re-

producción y tasas de mortalidad de las especies acuáticas, además afectan la productividad, estructura y función de los ecosistemas.

Los principales efectos del cambio climático sobre los ecosistemas acuáticos derivan de modificaciones en la temperatura del aire, los regímenes de precipitación y los vientos. Entre los impactos más evidentes se encuentra el incremento de la temperatura superficial en océanos, lagos y ríos, así como una mayor estabilidad térmica en cuerpos de agua con estratificación, lo que afecta los procesos de mezcla y oxigenación (Hondzo y Stefan, 1993; La-fayette *et al.*, 1998). Además, en regiones de alta montaña y latitudes templadas, se han observado temporadas sin hielo más prolongadas, congelaciones tardías y deshielos tempranos (Walsh, 1995; Livingstone, 1997; Livingstone, 2000).

³ Para conocer a mayor detalle la metodología de la FAO, consultar en:

http://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s08.htm

Las alteraciones en los patrones de precipitación impactan los ciclos hidrológicos y la escorrentía de los ríos, modificando la periodicidad y magnitud de los pulsos de inundación en humedales. Estos cambios pueden afectar la dinámica de nutrientes y los procesos biogeoquímicos, lo que influye en la disponibilidad de hábitats y en la estructura de las comunidades biológicas (Kernan *et al.*, 2010).

A nivel químico, el cambio climático está modificando la dinámica del Carbono Orgánico Disuelto (COD) en suelos y aguas superficiales. Este componente, producto de la descomposición parcial de la materia orgánica, influye en la transparencia del agua, el transporte de metales y la toxicidad. Su concentración puede verse alterada por el aumento de la temperatura, la variabilidad en la deposición de sulfatos y el derretimiento de nieve en zonas de alta montaña, lo que a su vez afecta la acidez del agua (Buffam *et al.*, 2007).

La productividad primaria en ecosistemas acuáticos también está sujeta a estos cambios. La temperatura y los niveles de luz determinan la disponibilidad de nutrientes, mientras que la variabilidad en la precipitación puede generar efectos contrapuestos. En periodos de baja precipitación, la escorrentía reducida puede afectar humedales y manglares; en periodos de alta precipitación, el

aumento en la carga de nutrientes puede desencadenar procesos de eutrofización y floraciones de algas nocivas (Ghosh *et al.*, 2016).

Los ecosistemas de alta montaña presentan un incremento en la concentración de solutos, debido a la liberación de minerales, a través del agua de deshielo glaciar (Kernan *et al.*, 2010). De manera similar, los océanos están experimentando acidificación como resultado de la mayor absorción de dióxido de carbono (CO₂) atmosférico, lo que afecta la calcificación de organismos marinos y altera las cadenas tróficas.

En Colombia, la gran diversidad de ecosistemas acuáticos y la alta vulnerabilidad del país, debido al cambio climático, han convertido el estudio de estos efectos en una prioridad nacional (Ideam *et al.*, 2017c). Los avances en la investigación han permitido evidenciar las múltiples formas en que el cambio climático está modificando los sistemas hídricos, lo que ha llevado a su incorporación como un eje central del Promsea. Dada la complejidad de los impactos por el cambio climático, el monitoreo de los ecosistemas acuáticos debe incluir un enfoque multidimensional, integrando variables físicas, químicas y biológicas para comprender la magnitud de las transformaciones y así diseñar estrategias de adaptación asertivas.

Monitoreo de emisiones de GEI y efectos del cambio climático en ecosistemas acuáticos

Existen dos enfoques principales para evaluar y enfrentar las causas y consecuencias del cambio climático. El primero es la mitigación, que abarca acciones dirigidas a reducir las emisiones de GEI y fortalecer sus sumideros. El segundo es la adapta-

ción, que comprende medidas orientadas a minimizar los impactos del cambio climático en los sistemas socioecológicos. A continuación, se presentan los dos enfoques y la propuesta metodológica diseñada para abordarlo en el marco del Promsea.

Enfoque de mitigación

Los humedales son ecosistemas donde los procesos biológicos y geoquímicos, así como la absor-

ción o emisión de gases de efecto invernadero, están regulados por el grado de saturación de agua,

el clima y la disponibilidad de nutrientes (IPCC, 2006). Al igual que en otros ecosistemas, el flujo neto de carbono entre la atmósfera y los humedales resulta del equilibrio entre la captura de carbono mediante la fotosíntesis y su liberación por descomposición. Tanto la absorción como la pérdida de carbono están influenciadas por el clima, la disponibilidad de nutrientes, la saturación de agua y el oxígeno disponible. En condiciones aeróbicas, la descomposición genera CO_2 , mientras que en ambientes anaeróbicos predominan las emisiones de CH_4 (Moore y Knowles, 1989).

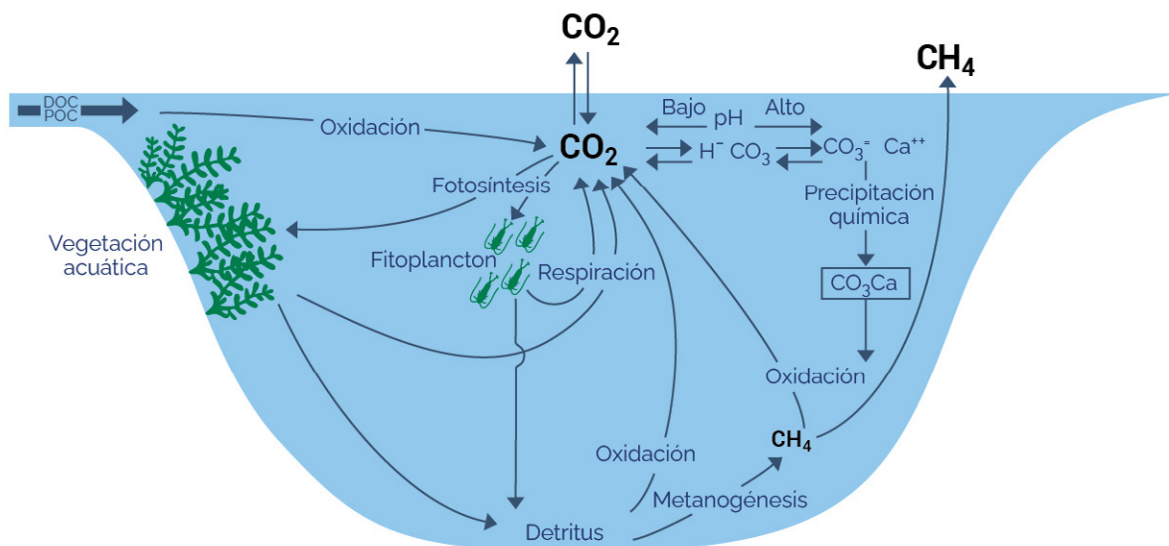
En la mayoría de los humedales, alrededor del 90% del carbono fijado en la producción primaria bruta retorna a la atmósfera por descomposición (Cicerone y Oremland, 1988). El material no descompuesto se deposita en el fondo del cuerpo de agua, acumulándose sobre capas previas.

Cuando los humedales están saturados o inundados, la actividad de bacterias aeróbicas y otros descomponedores se ve limitada por la escasez de oxígeno. Las condiciones anóxicas comunes en

los sedimentos impiden la descomposición completa de la materia orgánica. Sin embargo, algunas bacterias metanogénicas y sulfurógenas pueden degradar parte de esta materia, liberando metano (CH_4) y otros gases. Si el metano asciende a través de la columna de agua o el suelo aireado, bacterias metanótrofas pueden oxidarlo, parcialmente, y convertirlo en CO_2 , antes de que escape a la atmósfera (ver Figura 37).

Debido a estos procesos, los humedales suelen considerarse una fuente natural de CH_4 , con emisiones estimadas entre 55 y 150 Tg CH_4 /año (IPCC, 2000). Sin embargo, su drenaje puede reducir las emisiones de CH_4 y aumentar las de CO_2 , debido a una mayor oxidación de la materia orgánica del suelo. Por el contrario, la creación de humedales, mediante inundaciones, altera los patrones de emisión de GEI, aumenta las emisiones de CH_4 y reduce las de CO_2 . Dependiendo del clima y las características del reservorio, tanto el CO_2 como el CH_4 pueden ser liberados por la descomposición de la biomasa sumergida, la materia orgánica del suelo inundado y otras partículas de materia orgánica disuelta (IPCC, 2006).

Figura 37. Principales procesos y compartimentos implicados en el ciclo del carbono, en ecosistemas acuáticos epicontinentales

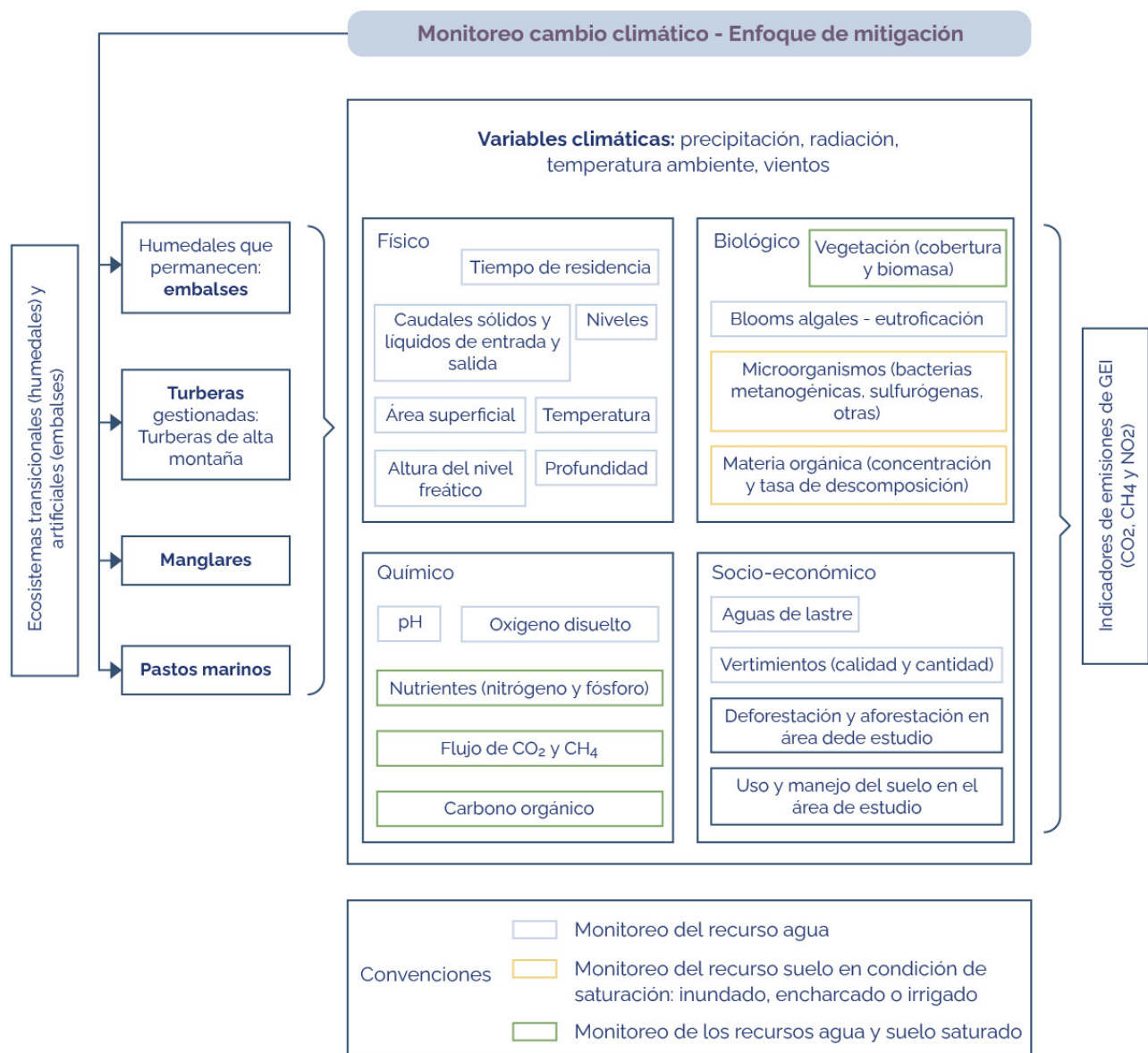


Fuente: Palau, Alonso y Corregidor (2009).

La investigación de Rosentreter *et al.* (2021) evidenció que los ecosistemas acuáticos contribuyen con el 41 % (mediana) o el 53 % (media) del total de las emisiones globales de metano, provenientes

de fuentes tanto antropogénicas como naturales. El estudio mostró que estas emisiones aumentan a medida que se pasa de ecosistemas naturales a ecosistemas acuáticos impactados, y de ecosiste-

Figura 38. Variables clave para el análisis de emisiones de GEI en ecosistemas acuáticos



mas costeros a ecosistemas de agua dulce. Asimismo, los metadatos analizados sugieren que las emisiones acuáticas podrían incrementarse debido a la urbanización, la eutrofización y las retroalimentaciones climáticas positivas. En este contexto, se considera necesario implementar estrategias de gestión del uso de la tierra como medidas de mitigación para reducir las emisiones de metano en los ecosistemas acuáticos.

Por otro lado, Yvon-Durocher *et al.* (2012), al analizar la relación entre el aumento de temperatura por cambio climático y la respiración ecosistémica en distintos hábitats (bosques, suelos, ríos, lagos, estuarios y mares), encontraron que, aunque a corto plazo (días o semanas) todos los ecosistemas responden de manera similar al incremento de temperatura, en términos de emisiones de CO₂, a largo plazo (un año, por ejemplo), la energía de

activación de la respiración en los ecosistemas acuáticos puede ser hasta el doble que en los ecosistemas terrestres. Esto implica que, en algunos casos, los ecosistemas acuáticos podrían generar hasta el doble de CO₂. Este fenómeno se explica por el flujo adicional de carbono que llega a estos ecosistemas desde los ecosistemas terrestres, transportado por la escorrentía tras las lluvias, lo que favorece una mayor oxidación del carbono acumulado.

En concordancia con estos hallazgos, el Promsea contempla la inclusión del monitoreo de emisiones de GEI, en algunos ecosistemas acuáticos del país, considerando la información disponible sobre variables clave para complementar los modelos de análisis actualmente utilizados (ver Figura 38).

Avances en la estimación de emisiones de GEI en los ecosistemas acuáticos del país

A pesar de los avances en la integración de datos para la estimación de emisiones de GEI en ecosistemas acuáticos, persisten vacíos metodológicos que dificultan establecer relaciones precisas entre estas emisiones y las actividades antrópicas que las afectan, como la contaminación y la fragmentación. La complejidad del ciclo del carbono y la influencia de múltiples factores han limitado el desarrollo de metodologías más detalladas. No obstante, a partir de los lineamientos del IPCC, el país ha logrado avances iniciales e identificado nuevas variables para fortalecer los análisis.

A continuación, se presentan los progresos alcanzados y las propuestas metodológicas formuladas, en el marco del Promsea, para mejorar la información y el monitoreo de GEI en estos ecosistemas.

Colombia es un país que tiene emisiones de efecto invernadero del orden del 0,4 % de las emisiones globales. Como nación altamente vulnerable a los

impactos del cambio climático y con una economía en crecimiento, tiene el compromiso de contribuir a la reducción de las emisiones globales de GEI, mientras avanza en la senda de desarrollo sostenible, resiliente y bajo en carbono (Ideam *et al.*, 2017b).

Para establecer metas de mitigación efectivas y medibles en el tiempo, es fundamental contar con un Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (Ingei) dinámico, con actualizaciones periódicas que permitan evaluar el estado y las tendencias de las emisiones en el territorio nacional. Desde 1990, el Ideam ha liderado la consolidación del Ingei, para dar cumplimiento a los compromisos de Colombia en el marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, que pide la elaboración del inventario nacional de los informes bienales de actualización y las comunicaciones nacionales.

El Ingei se ha construido con base en las metodologías del Panel Intergubernamental de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Panel Intergubernamental de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático [IPCC], 2006 y 2014), ajustadas a la realidad nacional. De ahí que se ha identificado la inclusión de ecosistemas acuáticos bajo la categoría de humedales.

De manera que, los humedales quedaron definidos como:

Áreas de extracción de turba y tierras cubiertas o saturadas de agua durante todo o parte del año (por ejemplo, turberas), que no están clasificadas como tierras forestales, tierras de cultivo, pastizales o asentamientos. También incluye embalses (subdivisiones gestionadas) y ríos y lagos naturales (subdivisiones no gestionadas) (IPCC, 2006).

El Capítulo 7 del IPCC (2006) proporciona lineamientos para la estimación y notificación de emisiones de GEI en humedales gestionados; es decir, aquellos donde el nivel freático ha sido modificado artificialmente (por ejemplo, drenados o elevados) o que han sido creados por actividad humana (por ejemplo, las represas). Actualmente, el Ingei de Colombia incluye algunos de estos ecosistemas clasificados en la categoría de tierras inundadas, reportados en el inventario nacional.

Los informes bienales de actualización y las comunicaciones nacionales de la siguiente manera:

- Humedales que permanecen (subcategoría 3B4a) – embalses: Emisiones de CO₂ y CH₄ por difusión en reservorios para generación de energía eléctrica. Se utilizan los métodos y factores recomendados en los Apéndices 2 y 3 de las Directrices del IPCC (2006) y los ajustes del Suplemento para LULUCIEF del IPCC (2014). Las emisiones de cada reservorio se estiman, durante diez años, a partir de su entrada en operación. La TCNCC (2017) cuantificó nueve embalses, además de algunas pocetas de sedimentación.

- Tierras convertidas a humedales (subcategoría 3B4bi) – tierras forestales convertidas en humedales: Estimación de emisiones derivadas de la conversión de bosques naturales en vegetación acuática o cuerpos de agua. Se reportan los cambios en los contenidos de carbono de la biomasa, la materia orgánica muerta (MOM) y los suelos minerales.

Para continuar incorporando la categoría de humedales en el INGEI, se busca fortalecer el plan de mejora de la calidad de los datos para la estimación de emisiones de GEI en embalses, así como ampliar la cobertura a otros ecosistemas acuáticos clave como turberas, manglares y pastos marinos.

A continuación, se presenta la hoja de ruta para el desarrollo de indicadores de emisiones de GEI en ecosistemas acuáticos, en coordinación con otros grupos de trabajo e instituciones dentro del marco del Promsea.

Hoja de ruta para avanzar en la generación de indicadores de emisiones de GEI en ecosistemas acuáticos

Estimación de emisiones de GEI (CO₂ y CH₄) en embalses

Los embalses son depósitos artificiales de agua generados con el propósito de utilizarla, posteriormente, en actividades de riego, abastecimiento

doméstico o producción de energía, entre otros. Generalmente, se construyen cerrando la boca de un valle mediante un dique o presa. Actualmente,

estudios realizados a nivel nacional e internacional han permitido evidenciar que estos ecosistemas artificiales no solo alteran el ciclo natural del carbono, sino que pueden convertirse en fuertes emisores de GEI (León y Rojas, 2020).

Lo anterior ha llevado a la necesidad de su inclusión en los inventarios nacionales de GEI, en el marco de los compromisos del país en relación con la Comisión Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Teniendo en cuenta los avances realizados por el país en torno al tema, se propone incluir la información de la categoría

3B4a del IPCC en la metodología del Protocolo, y aunar esfuerzos con los grupos de trabajo del Ideam, otras entidades del SINA y actores del sector para la mejora de la calidad de los datos.

Actualmente, la información de emisiones de GEI provenientes de los embalses del país se calcula de acuerdo con el Nivel 1 de la metodología del IPCC (ver Figura 39), utilizando como dato primario el área total de la superficie del reservorio y teniendo en cuenta los factores de emisión propuestos por el IPCC, considerando los primeros 10 años de operación.

Figura 39. Ecuaciones empleadas para la categoría de Humedales (3B4a)

Ecuación 2a.1 y 3a.1: Emisiones de CO₂ y CH₄ provenientes de las tierras inundadas (NIVEL 1)

(IPCC - 2006, volumen 4, Apéndice 2 y 3)

$$GEI_{emisiones\ tierra\ inund} = P * E(GEI_{EQ})_{diff} * A_{total\ inund} * f_A * 10^{-6}$$

Dónde:

$GEI_{emisiones\ tierra\ inund}$ = total de emisiones de GEI desde la tierra convertida a tierra inundada, Gg GEI año⁻¹

P = número de días sin cobertura de hielo durante un año, días año⁻¹

$E(GEI)_{diff}$ = promedio diario de emisiones por difusión, kg GEI ha⁻¹ día⁻¹

$A_{total\ inund}$ = área total de la superficie del reservorio, incluyendo tierras inundadas, lagos y ríos, ha

f_A = fracción del área total del reservorio que fue inundada durante los últimos 10 años

Nota: Hace referencia a la descomposición de la biomasa aérea que queda en el sitio y la materia orgánica del suelo que contribuirán a las emisiones en el embalse.

Fuente: IPCC (2006).

Con el fin de mejorar la información de emisiones de CO₂ y CH₄ en embalses, se propone dar continuidad al plan de mejora del Informe Bienal de Actualización (BUR por su sigla en inglés) y complementarlo, mediante la consolidación de estrategias para:

- Incluir información de áreas de pequeños reservorios.
- Mejorar la información de la fracción anual inundada: garantizar el reporte por parte de pequeños reservorios e incluir información de reportes diarios de niveles para embalses.
- Incluir información de la biomasa existente antes de la construcción y llenado: cobertura vegetal.
- Incluir variables adicionales que pueden aportar a generar modelos nacionales robustos, entre las que se identificaron las siguientes:

– Categorización de embalses según los principales factores responsables de la variabilidad entre los mismos, especialmente la zona climática y el basamento geológico (lo que afecta fuertemente el pH).

- Temperatura del agua.
- Tiempo de residencia.
- pH.
- Caudales sólidos y líquidos de entrada y salida.
- Microorganismos asociados a la descomposición de materia orgánica y producción de CO₂ y CH₄.
- Profundidad media y batimetría.
- Contenido de carbono orgánico en suelos, en detritos y en biomasa vegetal.



– Análisis de la información según periodos hidroclimáticos.

- Construir un modelo metodológico y de análisis para la estimación de GEI en un embalse del país (representativo y comparable con otros embalses), a través de proyectos de investigación que permitan el ajuste de las estimaciones de emisiones de GEI a la realidad. Se espera que se tenga en cuenta la integración de las variables adicionales propuestas y otras que puedan ser incluidas, de acuerdo con la información oficial.
- Revisar factores de descomposición de la biomasa vegetal según investigaciones en el país y su relación con factores de emisión de las distintas vías: difusiva, ebullición y desgaseificación (debe considerar distinción entre materia orgánica de biomasa vegetal antes de la inundación y materia orgánica aportada aguas arriba del reservorio).
- Revisar la posibilidad de implementación de metodologías para la estimación de materia orgánica aguas arriba y abajo del embalse.

Estimación de emisiones de GEI en turberas gestionadas

Las turberas, definidas como herbazales y arbustales inundables ubicados a más de 2.800 m.s.n.m., se desarrollan en climas fríos y húmedos sobre suelos hidromórficos (Ideam *et al.*, 2020). Aunque representan solo el 3 % de la superficie terrestre mundial (IPCC, 2014), almacenan cerca de un tercio del carbono del suelo, a nivel global. Las turberas desempeñan un papel clave en la regulación del flujo hídrico y la calidad del agua (Landeo y Oyague, 2020). Sin embargo, el drenaje de estos ecosistemas contribuye aproximadamente al 10 % de las emisiones de CO₂ y otros GEI provenientes del sector agrícola, forestal y otros usos de la tierra.

- Revisar la posibilidad de estimación de vertimientos aguas arriba del embalse (calidad y cantidad).
- Revisar la posibilidad de utilizar modelos que permitan estimar las emisiones de GEI, a partir de información accesible por medio de sensores remotos.

Las variables anteriormente mencionadas se proponen teniendo en cuenta que hacen parte de las sugeridas por el IPCC y por los expertos en la consulta realizada en el Taller Internacional sobre Monitoreo y Seguimiento de Ecosistemas Acuáticos. Adicionalmente, algunas de estas variables se encuentran entre las que mide el sector hidroeléctrico para dar cumplimiento a los planes de manejo, monitoreo y seguimiento, según el licenciamiento ambiental; en tanto que otras hacen parte de los registros de bases de datos de información de entidades nacionales, tanto del Sina, como de otros sectores involucrados. No obstante, toda la información recibida requerirá de una revisión de calidad para ser integrada al análisis.

A pesar de su relevancia, solo una pequeña fracción de los países con ecosistemas ricos en carbono ha integrado las turberas en sus Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC por su sigla en inglés) (Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional [CGIAR], 2019). En este contexto, y con el propósito de fortalecer el Ingei de Colombia, el Ideam ha trabajado en la revisión de metodologías para incluir las turberas gestionadas en los análisis nacionales. Según la definición del IPCC, estas turberas han sido despejadas y drenadas para usos energéticos, hortícolas u otros (IPCC, 2006), lo que implica la transformación y degradación de estos ecosistemas acuáticos.

Como resultado de este esfuerzo, en la primera fase del proceso se desarrolló una propuesta preliminar de diseño metodológico para la recopilación de datos de actividad (DA) y factores de emisión (FE) en turberas gestionadas de alta montaña. Para ello, se establecieron pasos clave como la identificación de su extensión, el tipo de vegetación y

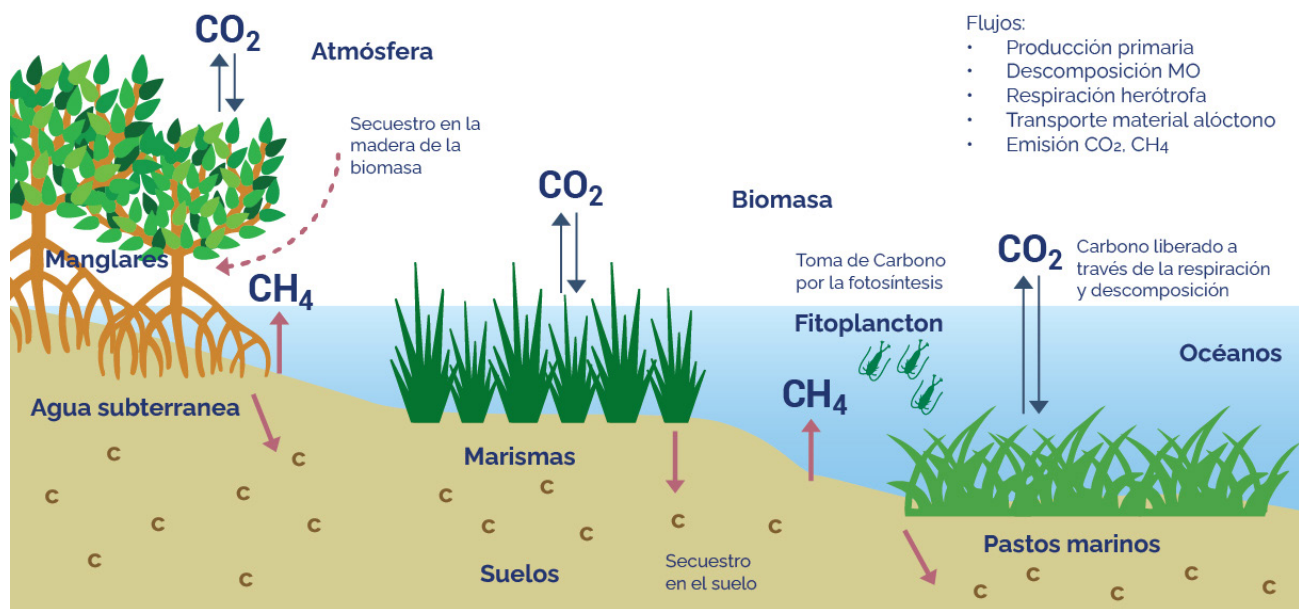
suelo asociados, los cambios en el uso del suelo y el análisis de componentes como materia orgánica muerta, detritos y flujos de carbono. Estos procedimientos se basan en los lineamientos del IPCC para humedales permanentes (IPCC, 2006), con énfasis en suelos orgánicos hidromórficos (IPCC, 2014).

Estimación de emisiones de GEI en manglares y pastos marinos – Carbono azul

Los manglares son ecosistemas arbóreos naturales que se desarrollan en las zonas intermareales de las costas tropicales y subtropicales, caracterizados por su alta productividad y su papel fundamental en la estabilidad ecológica de las regiones costeras (OIMT *et al.*, 2005). Estos ecosistemas almacenan grandes cantidades de carbono en suelos anóxicos, inundados por las mareas y pueden alcanzar reservas superiores a 1.000 toneladas de carbono por hectárea (Donato *et al.*, 2011), lo que los convierte en actores clave en la mitigación del cambio climático.

De manera similar, los pastos marinos son considerados uno de los sumideros naturales de carbono más eficientes del planeta. A través de la fotosíntesis, capturan y almacenan CO₂ en sus suelos, durante milenios, por lo que contribuyen significativamente a la reducción de GEI (Serrano *et al.*, 2021). Su capacidad para fijar y retener carbono los convierte en un componente esencial de los ecosistemas marinos y costeros, en el contexto del cambio climático (ver Figura 40).

Figura 40. Principales compartimentos y flujos de Carbono Azul en los ecosistemas marino - costeros



Fuente: Modificado de Howard *et al.* (2017).

Reconociendo la importancia de estos ecosistemas, Colombia ha ratificado su compromiso con la mitigación y adaptación al cambio climático, en el marco de la CMNUCC, el Acuerdo de París y la iniciativa *Because the Ocean*. En este contexto, el país ha resaltado el papel de los manglares y pastos marinos en la reducción de emisiones de GEI y su contribución a la resiliencia climática de las zonas costeras. Como parte de los compromisos adquiridos, el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022: Pacto por Colombia, pacto por la equidad establece la formulación de iniciativas de carbono azul, en la región Caribe (Charry-Ruiz y Guerra-Vargas, 2020).

Entre 2019 y 2020 se desarrolló una propuesta de hoja de ruta para consolidar acciones técnico-científicas, técnico-administrativas y técnico-jurídicas con el fin de avanzar en la meta de formulación de iniciativas de carbono azul, para la región Caribe. Este proceso contó con la participación de diversas instituciones nacionales, como el Ideam y el Inveemar, bajo la dirección del MinAmbiente.

Algunos métodos utilizados para la estimación de carbono y flujo de GEI en ecosistemas acuáticos transicionales (humedales)

La acumulación neta de carbono en los humedales es el resultado del equilibrio entre la productividad primaria, la deposición de material orgánico alóctono y la descomposición de la materia orgánica en el suelo. Este balance define si un humedal funciona como un sumidero de carbono o como una fuente emisora de GEI. La acumulación de carbono

Las acciones planteadas en esta hoja de ruta incluyen: la definición y validación del concepto de carbono azul en el país, la construcción de una línea base para estos ecosistemas, la identificación y priorización de áreas geográficas para la implementación de iniciativas, así como la adopción de estrategias de carbono azul, en ecosistemas marinos y costeros. Además, se contempla la revisión de la zonificación y el régimen de uso de ecosistemas de manglar y pastos marinos, junto con la creación de sistemas interinstitucionales de monitoreo.

A partir de este proceso, se espera que las mesas de trabajo del Espacio Técnico Científico de Carbono Azul (ETCCA) logren consolidar una metodología nacional consensuada para el monitoreo del carbono azul. De esta manera se podrá fortalecer el seguimiento de estos ecosistemas y su papel en la mitigación del cambio climático, asegurando su inclusión en futuras versiones del Promsea.

ocurre, principalmente, en dos compartimentos: la biomasa vegetal y los suelos (Hernández, 2009).

A continuación, se describen estos compartimentos y las metodologías utilizadas para estimar la cantidad de carbono almacenado en cada uno.

Carbono orgánico y biomasa vegetal

Los humedales albergan una vegetación adaptada a niveles freáticos elevados y a inundaciones periódicas, lo que influye en la dinámica del carbono dentro de estos ecosistemas. A través de la fotosíntesis, las plantas convierten el carbono inorgánico

atmosférico (CO₂) en carbono orgánico, principalmente en forma de carbohidratos (C₆H₁₂O₆) (Dise, 2009). Aproximadamente, el 50 % de este carbono es respirado por las plantas y liberado nuevamente al ambiente, mientras que el resto se incorpora a la

biomasa vegetal, constituyendo la Producción Primaria Neta (PPN) (Whitaker, 2013). Cuando la PPN es positiva, la biomasa vegetal del ecosistema aumenta, dependiendo de factores como la radiación, temperatura, frecuencia y duración de inundaciones, caudal y concentración de nutrientes o toxinas en el suelo (Kirk, 2004).

La estimación del carbono en la biomasa vegetal considera tanto la biomasa aérea como la subterránea, para lo cual se emplean dos métodos principales. El método directo o destructivo consiste en la medición del peso seco de los componentes vegetales, siendo útil para la construcción de ecuaciones alométricas y factores de expansión de biomasa (Rügnitz *et al.*, 2009). Por otro lado, el método indirecto emplea ecuaciones alométricas que permiten estimar la biomasa total de una especie,

a partir de mediciones morfológicas básicas obtenidas en campo. Así se facilita la extrapolación de los resultados sin necesidad de destrucción de las muestras (Rügnitz *et al.*, 2009).

Para calcular el contenido de carbono a partir de la biomasa, se multiplica la cantidad de biomasa de cada componente por su porcentaje de carbono. Este valor puede determinarse mediante análisis de combustión seca en laboratorio o, en ausencia de mediciones específicas, empleando valores de referencia disponibles en la literatura. En general, la concentración de carbono en la madera es cercana al 50 %, por lo que en estudios donde no se dispone de datos locales, se emplea un factor de conversión de 0,46 a 0,50 (Kauffman *et al.*, 2013).

Carbono orgánico en suelos de humedales

El suelo representa la mayor reserva de carbono del planeta, con aproximadamente 1500 Pg de carbono orgánico, una cantidad que supera en 2,1 veces el carbono presente en la atmósfera y en 2,7 veces, la reserva biótica almacenada en las plantas (Neill *et al.*, 1998). En el caso específico de los suelos de humedales, su potencial de almacenamiento de carbono es particularmente alto debido a las condiciones anaerobias, las cuales reducen significativamente la velocidad de descomposición de la materia orgánica (Collins y Kuehl, 2000). La acumulación de turba, un material fibroso, parcialmente descompuesto, que se forma en ambientes anegados (Mitsch y Gosselink, 2000), constituye el principal sumidero de carbono en estos ecosistemas (Hernández, 2009).

Para estimar el Carbono Orgánico en Suelos (COS), se pueden emplear tres enfoques: muestreo y medición físicos, estimación modelada o uso de valores asumidos. Sin embargo, cuando el objetivo es evaluar cambios en el contenido de carbono a lo largo del tiempo, el muestreo físico es la estrategia más confiable. Este proceso debe ser cuidadosamente planificado desde el inicio, considerando

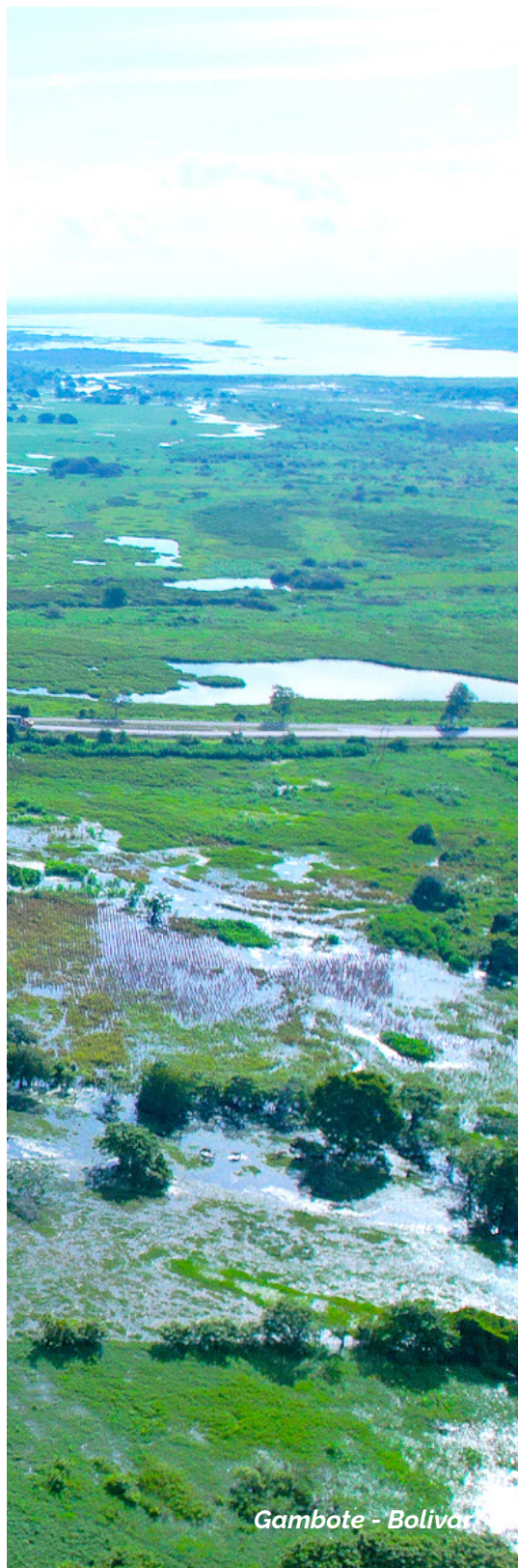
factores ambientales que influyen en la heterogeneidad del COS (tipo de suelo, vegetación, clima y manejo del uso del suelo) (Conant *et al.*, 2011). Además, es crucial que los métodos aplicados cumplan con estándares que garanticen la fiabilidad de los resultados, incluyendo la determinación de parámetros esenciales como la densidad aparente del suelo (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2019).

El muestreo físico de suelo se basa en la extracción de muestras dentro de un rango de profundidad predefinido (por ejemplo, 0 - 30 cm) utilizando herramientas especializadas, como un barrenado ruso de volumen conocido con un diámetro entre 5 y 10 cm. Este procedimiento permite calcular la densidad aparente del suelo y su masa. Posteriormente, las muestras son transportadas a laboratorio para determinar el contenido de carbono, mediante técnicas de combustión seca o en húmedo. Para expresar el COS, en términos de toneladas por hectárea, es necesario considerar el espesor de los horizontes muestreados, la densidad aparente del suelo y aplicar un factor de corrección por fragmentos de roca (FAO, 2019).

Flujos de GEI (CO₂ y CH₄) en humedales

El metano (CH₄) es un GEI con un impacto significativo en el calentamiento global, ya que su potencial de calentamiento global en una escala de 100 años es 21 veces mayor que el del CO₂ (Tauchnitz *et al.*, 2008). Aunque su concentración en la atmósfera es menor que la del CO₂, su contribución al cambio climático es considerable, representando aproximadamente el 20 % del calentamiento global actual y con el potencial de convertirse en el gas dominante en el futuro (Zhu *et al.*, 2007). Entre las principales fuentes emisoras de CH₄ se encuentran los humedales, que contribuyen entre el 40 % y el 55 % de las emisiones anuales globales de este gas (Boon y Lee, 1997; Christensen *et al.*, 2003; Bodelier y Laanbroek, 2004; Hernández, 2009). Si bien estos ecosistemas son reconocidos como sumideros de carbono, su drenaje y desecación pueden estimular la oxidación del carbono almacenado, y liberan CO₂.

Para estimar los flujos de GEI (CO₂ y CH₄) en humedales, se emplean metodologías basadas en la instalación de cámaras transparentes sobre los suelos y la vegetación del área de estudio. Estas cámaras permiten la captura de muestras de gas en intervalos de tiempo determinados, las cuales son posteriormente analizadas en un cromatógrafo de gases, para cuantificar las concentraciones de CH₄ y CO₂. A partir de estos datos, se calculan los flujos de emisión de gases hacia la atmósfera ($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$) en función de la superficie cubierta por la cámara y la variación en la concentración de gases. Adicionalmente, para evaluar el intercambio de CO₂, se realizan mediciones tanto en condiciones de luz (para estimar la fotosíntesis) como en oscuridad (para medir la respiración del ecosistema). Con el fin de obtener una visión integral de las emisiones anuales de gases, se llevan a cabo evaluaciones espaciales y temporales en los humedales (Alford *et al.*, 1997; Vann y Megonigal, 2003; Inubushi *et al.*, 2005; Altor y Mitsch, 2006; Hernández, 2009).

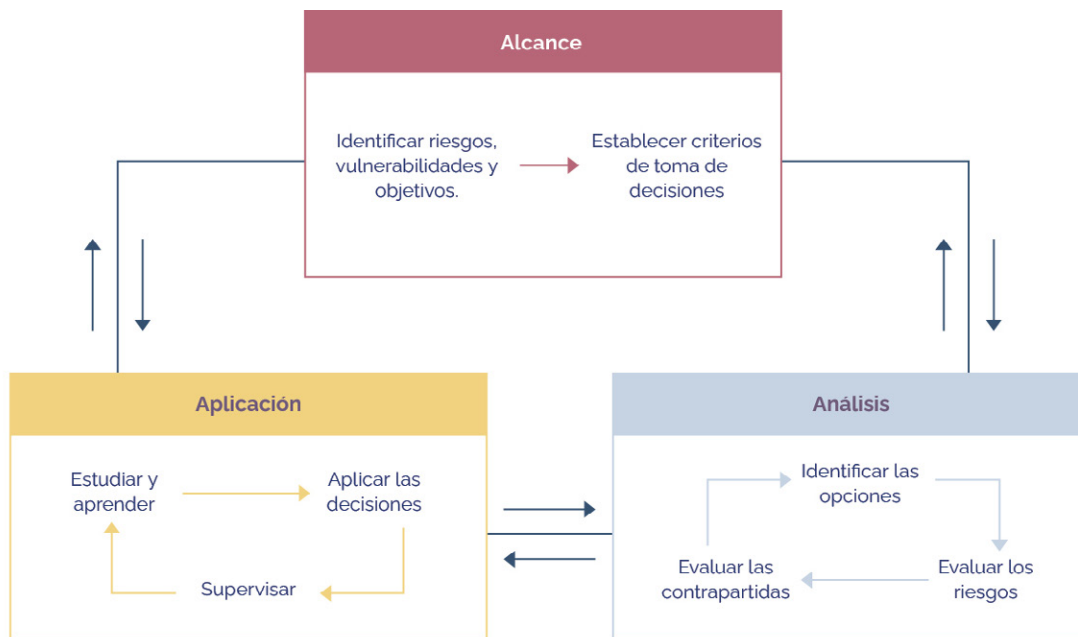


Enfoque de adaptación

La adaptación es un componente fundamental en la respuesta mundial, a largo plazo, frente al cambio climático, cuyo fin es proteger a las personas, los medios de vida y los ecosistemas. Se define como el proceso de ajuste a las condiciones climáticas actuales o proyectadas y sus efectos (Ideam *et al.*, 2017). Así como el Ingei proporciona la base

de información para la priorización de medidas de mitigación, los escenarios de cambio climático y los análisis de vulnerabilidad y riesgo (ver Figura 41) constituyen el fundamento para la identificación y planificación de medidas de adaptación efectivas y prioritarias.

Figura 41. Estructura de Adaptación



Fuente: IPCC (2014b).

Para comprender cómo podrían evolucionar las variables climáticas bajo distintos niveles de concentración de GEI de origen antropogénico, es necesario el uso de escenarios de cambio climático. Estos escenarios son descripciones coherentes, internamente consistentes y plausibles de posibles estados futuros del clima, representados, principalmente, a través de cambios en la temperatura y la precipitación (Ideam *et al.*, 2017). Generalmente, se

utilizan múltiples escenarios para reflejar el rango de incertidumbre en las proyecciones climáticas.

En 2017, Colombia presentó en la TCNCC con los escenarios de vulnerabilidad y riesgo, construidos a partir de la metodología *Outcome Vulnerability*. Esta metodología se basa en una aproximación de modelación y meta-análisis, integrando indicadores y estudios de caso. Se enmarca dentro de la

categorización propuesta por Pearson y Langridge (2008), lo que permite la comparabilidad futura de las distintas unidades de análisis, en este caso, los municipios.

En relación con esta se definieron los siguientes aspectos y conceptos:

- Aspectos metodológicos:
 - Uso del Escenario RCP 6.0.
 - Uso de la ventana temporal de análisis 2011-2040.
 - Análisis Multidimensional.
 - Integración de análisis Marino-costeros e insulares con análisis continentales.
 - Comparabilidad entre las unidades de análisis municipales.
 - Trazabilidad en el análisis.
 - Generación de línea base para comparabilidad futura.
 - Datos abiertos.
- Conceptos metodológicos (IPCC, 2014b y Cardona *et al.*, 2012):
 - Riesgo: posibilidades, cuando el resultado es incierto, de que ocurran consecuencias adversas para la vida; los medios de subsistencia; la salud; los ecosistemas y las especies; los bienes económicos, sociales y culturales; los

servicios (incluidos los servicios ambientales) y la infraestructura.

- Amenaza: potencial ocurrencia de eventos de cambio climático que pueden tener un impacto físico, social, económico y ambiental en una zona determinada por un cierto periodo. Cada amenaza se caracteriza por su localización, frecuencia e intensidad (Cardona *et al.*, 2012).
- Vulnerabilidad: propensión o predisposición a ser afectado negativamente. Comprende una variedad de conceptos y elementos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad de respuesta y adaptación.
- Sensibilidad: Grado en que un sistema o especie resultan afectados, positiva o negativamente, por la variabilidad o el cambio climático. Los efectos pueden ser directos (por ejemplo: una variación del rendimiento de los cultivos en respuesta a una variación de la temperatura media, de los intervalos de temperatura o de la variabilidad de la temperatura) o indirectos (por ejemplo: los daños causados por un aumento de la frecuencia de las inundaciones costeras como consecuencia de una elevación del nivel del mar).
- Capacidad adaptativa: capacidad de los sistemas, las instituciones, los seres humanos y otros organismos para adaptarse ante posibles daños, aprovechar las oportunidades o afrontar las consecuencias.

En términos matemáticos, la relación entre estos conceptos se define de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{Riesgo} &= \mathbf{Amenaza} * \mathbf{Vulnerabilidad} \\
 \mathbf{Riesgo por cambio climático} &= \Delta \mathbf{Amenaza (Exposición)} \\
 &* \mathbf{(Sensibilidad/Capacidad Adaptativa)}
 \end{aligned}$$

Para la construcción del sistema de indicadores de la TCNCC, se establecieron seis dimensiones a abordar: seguridad alimentaria, recurso hídrico, biodiversidad y servicios ecosistémicos, salud, hábitat humano e infraestructura. Dentro de cada una de estas dimensiones se identificaron y clasificaron indicadores de amenaza, sensibilidad y capacidad adaptativa, lo que permitió, a través de un modelo estadístico, estimar la vulnerabilidad y el riesgo frente al cambio climático.

En relación con esta metodología, se han identificado algunos indicadores adicionales que podrían incorporarse en la medida en que se implemente el Promsea. Estos indicadores están, principalmen-

te, relacionados con la sensibilidad de los ecosistemas acuáticos al cambio climático. A partir de ellos, y mediante la identificación de indicadores de capacidad adaptativa correspondientes a medidas de adaptación, sería posible estimar su vulnerabilidad. Esto contribuiría a la mejora de la metodología nacional, considerando la importancia de los ecosistemas acuáticos en términos de sus funciones ecológicas y su representatividad en el territorio colombiano.

En las tablas 46, 47 y 48 se describen los indicadores sugeridos, la utilidad y la clasificación propuesta.

Tabla 46. Posibles impactos (directos e indirectos) e indicadores de los efectos del cambio climático sobre los ambientes acuáticos lénticos

Categoría		Impacto	Indicador	Justificación del indicador	Dimensión del indicador (TCNCC)
Hidrología	Cobertura de hielo	Una mayor temperatura del aire y, por lo tanto, del agua, conduce a un período de cobertura de hielo más corto	Duración de la capa de hielo Momento de la ruptura del hielo Espesor del hielo	La duración de la capa de hielo se puede monitorear con herramientas de teledetección (sensores remotos)	Recurso hídrico
	Estratificación	Temperaturas más altas dan como resultado un inicio más temprano y una prolongación de la estratificación durante la temporada seca. Como resultado, se producen cambios en los procesos de mezcla (monomícticos, dimícticos, polimícticos)	Temperatura del agua en época de sequía	Los perfiles de temperatura del agua reflejan el estado de estratificación de los ambientes acuáticos lénticos	Recurso hídrico

Categoría		Impacto	Indicador	Justificación del indicador	Dimensión del indicador (TCNCC)
	Nivel del agua	El aumento de temperatura y la disminución de las precipitaciones junto con el uso intensivo de agua disminuyen los volúmenes de agua. Esto conduce a desequilibrios del recurso y, en muchos casos, a la pérdida total	Superficie del ambiente acuático léntico que se esté analizando (lago, laguna, charca, estanque, pantano, entre otros)	Su monitoreo es posible con herramientas de teledetección (sensores remotos)	Recurso hídrico
Aspectos físicos y químicos del agua	Disminución y/o agotamiento del oxígeno	Las altas temperaturas estimulan el crecimiento del fitoplancton, lo que conduce al agotamiento del oxígeno en hábitats profundos	Concentración de oxígeno en el fondo de los ambientes acuáticos lénticos que se estudien, en época seca	El parámetro suele estar incorporado en el monitoreo químico de los ambientes lénticos	Recurso hídrico
Producción primaria	Efectos de la temperatura del agua sobre el fitoplancton	El aumento de la temperatura del agua conduce a cambio de diatomeas y criptófitas a un predominio de cianobacterias	Biomasa y composición del fitoplancton Floraciones algales de cianobacterias	Las floraciones algales afectan la calidad del agua, la disponibilidad de oxígeno y representan un riesgo para la salud humana, animal y el equilibrio ecológico. Contar con esta información permite anticipar episodios de deterioro de la calidad del agua y diseñar medidas de manejo oportunas	Biodiversidad y servicios ecosistémicos

Categoría		Impacto	Indicador	Justificación del indicador	Dimensión del indicador (TCNCC)
Producción secundaria	Efectos de la temperatura del agua sobre el zooplancton	Temperaturas altas del agua conducen a cambios en la composición de la comunidad de zooplancton	Biomasa y composición del zooplancton Clases de zooplancton de acuerdo con el tamaño	La composición de la comunidad de zooplancton es clave para conocer la salud del agua y los impactos sobre la red trófica acuática	Biodiversidad y servicios ecosistémicos
	Propagación de especies exóticas	Las temperaturas más altas a menudo favorecen la proliferación de especies exóticas de peces, macrófitos o macroinvertebrados	Proporción de especies exóticas en el ambiente acuático léntico en monitoreo	La presencia de estas especies puede desplazar a las especies nativas, alterar la estructura de los ecosistemas, reducir la biodiversidad y afectar los servicios que estos ecosistemas brindan, como el suministro de agua limpia y la pesca	Biodiversidad y servicios ecosistémicos
Redes tróficas	Efectos de la temperatura del agua sobre las redes tróficas	Se ha evidenciado que el aumento de la temperatura del agua genera cambios en las redes tróficas. Por ejemplo, favorece la proliferación de especies de peces ciprínidos planctívoros, mientras se suprimen especies de zooplancton de grandes tamaños y, se reduce la intensidad del pastoreo	Proporción de especies de peces planctívoros y piscívoros Proporción y tamaño de especies de zooplancton	La estructura de la red alimentaria se refleja bien en estos dos parámetros La proporción de especies planctívoras determina los efectos sobre el zooplancton. La proporción de especies grandes de zooplancton determina los efectos sobre el fitoplancton	Biodiversidad y servicios ecosistémicos

Fuente: Modificado de Kernan et al. (2010).

Tabla 47. Posibles impactos (directos e indirectos) e indicadores de los efectos del cambio climático sobre los ambientes acuáticos lóticos

Categoría		Impacto	Indicador	Justificación del indicador	Dimensión del indicador (TCNCC)
Hidrología	Aumento de la frecuencia y duración de las sequías	La disminución de las precipitaciones y el aumento de la temperatura del aire cambian el carácter de algunos ríos pequeños y quebradas de permanentes a temporales	Periodos de sequía	El registro de los períodos de sequía es importante porque permite evaluar la disponibilidad del recurso hídrico y anticipar riesgos de desabastecimiento. Así mismo, identificar la transición de ríos permanentes a intermitentes es importante porque refleja la pérdida de caudal base y sus efectos sobre los ecosistemas acuáticos y los usuarios del agua	Recurso hídrico
	Cambio de régimen permanente a intermitente	Debido a la menor precipitación y la mayor demanda de agua dulce, las más altas temperaturas y a la transpiración, muchos ríos pequeños y quebradas pueden volverse intermitentes, con larga época de estiaje	Periodos de sequía		Recurso hídrico
Morfología	Mayor entrada de sedimentos finos	Los eventos de precipitación extrema aumentan la escorrentía superficial y conducen a que grandes cantidades de sedimentos finos ingresen a ambientes acuáticos lóticos	Número y eventos de descarga o inundación en temporadas inusuales (registrado por estaciones de aforo)	Los sedimentos finos alteran la calidad del hábitat acuático, reducen la transparencia del agua y afectan los procesos ecológicos	Recurso hídrico

Categoría		Impacto	Indicador	Justificación del indicador	Dimensión del indicador (TCNCC)
Aspectos físicos y químicos	Incremento de sustancias eutroficantes	El flujo de N en la escorrentía y la descomposición de la materia orgánica del suelo aumenta con la temperatura, lo que incrementa las concentraciones de nutrientes. La eutrofización se ve aún más favorecida por un alto tiempo de retención de agua debido a una baja descarga	Concentración de nitrato (NO ₃), nitrógeno total (N-total), concentración de fosfato (PO ₄)	Evaluar las concentraciones de nutrientes es importante porque el exceso de nitratos y fosfatos favorece la eutrofización, afecta la calidad del agua y genera riesgos para la biodiversidad y los usos humanos	Recurso hídrico
	Disminución de la calidad del agua	El aumento de la temperatura del agua favorece la producción y la intensidad de la descomposición, lo que conduce al agotamiento del oxígeno, especialmente durante la noche	Índices sapróbicos	Los índices sapróbicos reflejan la carga orgánica en las corrientes y, finalmente, el contenido de oxígeno. Las especies con una alta demanda de oxígeno (típico de índices sapróbicos bajos) desaparecerán, mientras que las especies con una demanda baja de oxígeno (típico de índices sapróbicos altos) se beneficiarán	Recurso hídrico
Producción primaria	Aumento del crecimiento de macrófitos/algas	Más altas temperaturas del agua y menor descarga favorecen el crecimiento de macrófitas y algas	Temperatura del agua (valores medios mensuales). Área cobertura de macrófitas	Registrar la expansión de macrófitos y algas es importante porque altera la estructura de las comunidades	Recurso hídrico/Biodiversidad y servicios ecosistémicos

Categoría	Impacto	Indicador	Justificación del indicador	Dimensión del indicador (TCNCC)	
			acuáticas, modifica la disponibilidad de oxígeno y nutrientes, y genera desequilibrios que afectan la biodiversidad y los servicios ecosistémicos		
Producción	Tasa de respiración	Las tasas metabólicas de bacterias y de especies detritívoras aumentarán con el incremento de las temperaturas. La proporción entre la producción primaria y la respiración disminuirá	Porcentaje de recolectores en la comunidad de invertebrados	Medir la proporción entre producción primaria y respiración es importante porque refleja el balance energético del ecosistema y muestra la presión sobre el oxígeno disponible para los procesos biológicos	Biodiversidad y servicios ecosistémicos
	Reemplazo de especies de agua fría (peces, macroinvertebrados)	Las especies de peces e invertebrados altamente adaptadas a aguas frías desaparecerán de estos hábitats a medida que la temperatura se incremente	Temperatura del agua	Observar la pérdida de especies adaptadas a aguas frías es importante porque evidencia los límites ecológicos frente al aumento de la temperatura y anticipa transformaciones en las cadenas tróficas acuáticas	Recurso hídrico

Categoría		Impacto	Indicador	Justificación del indicador	Dimensión del indicador (TCNCC)
	Aumento de estrategia r	Los invertebrados con estrategia r se benefician de inundaciones impredecibles	Número y descarga de eventos de inundaciones en temporadas inusuales	Registrar la proliferación de especies con estrategia r es importante porque muestra la respuesta de las comunidades acuáticas a disturbios extremos y permite evaluar cambios en la estructura poblacional de los ecosistemas	Recurso hídrico
	Propagación de especies exóticas	Las temperaturas más altas a menudo favorecen la colonización de especies exóticas	Proporción de especies exóticas en el ambiente acuático lóticos monitoreado	Este parámetro revela procesos de invasión biológica que desplazan a las especies nativas, reducen la biodiversidad y afectan la provisión de servicios ecosistémicos	Biodiversidad y servicios ecosistémicos

Fuente: Modificado de Kernan et al. (2010).

Tabla 48. Posibles impactos (directos e indirectos) e indicadores de los efectos del cambio climático sobre los ambientes acuáticos transicionales (humedales)

Categoría		Impacto	Indicador	Justificación del indicador	Dimensión del indicador (TCNCC)
Hidrología	Retención de agua de inundación	El aumento de la temperatura puede generar un aumento de las tasas de evaporación	Altura del nivel freático	La retención de agua de la inundación será mayor en la medida en que el	Recurso hídrico

Categoría	Impacto	Indicador	Justificación del indicador	Dimensión del indicador (TCNCC)	
			nivel freático sea más profundo		
	Recarga de aguas subterráneas	La capacidad de recargar los acuíferos se afecta por la desecación	Altura del nivel freático	Si el nivel freático es alto, se incrementa la tasa de recarga de agua subterránea (si la hubiera)	Recurso hídrico
	Retención de sedimentos	Lavado de sedimentos por fenómenos meteorológicos extremos	Frecuencia y severidad (intensidad) de eventos meteorológicos extremos	Las tormentas y crecidas repentinas asociadas pueden arrastrar los sedimentos y los detritos, reduciendo su retención	Recurso hídrico
Aspectos físicos y químicos	Captura de carbono	Condiciones cálidas y húmedas favorecen la captura de carbono	Temperatura y precipitación	Indicadores generales de la dinámica del carbono en ecosistemas acuáticos	Recurso hídrico
	Captura de carbono	La retención de carbono incrementa en la medida en que las más altas temperaturas favorezcan la producción primaria, pero se reducen si los eventos de escorrentía aumentan en frecuencia	Tasa de productividad primaria	La retención de carbono en la vegetación y los detritos incrementa con el aumento de la productividad primaria	Biodiversidad y servicios ecosistémicos

Categoría		Impacto	Indicador	Justificación del indicador	Dimensión del indicador (TCNCC)
	Transferencia de nutrientes	El aumento de la productividad conduce a una mayor provisión de detritos orgánicos, que luego quedan disponibles para la transferencia (exportados) aguas abajo	Producción de detritos	La exportación de nutrientes aumenta si la producción de detritos es alta	Recurso hídrico
	Retención de nutrientes	Sequías más extremas y temperaturas más cálidas pueden conducir a un aumento de la producción primaria	Tasa de productividad primaria	La retención de nutrientes es potencialmente mayor donde la productividad es alta	Biodiversidad y servicios ecosistémicos
Productividad primaria	Ensamblajes de vegetación	Los cambios en el nivel freático inciden en la colonización y supervivencia de las plantas del humedal	Altura del nivel freático Ensamblaje de la vegetación	La altura del nivel freático y los ensamblajes de vegetación están directamente relacionados	Recurso hídrico
Productividad secundaria	Especies de insectos	La variabilidad en la temperatura es un factor importante en la supervivencia de diversas especies de insectos. Los cambios pueden alterar los rangos tolerables de algunas especies, incluidas las plagas Puede haber invasión de especies exóticas en nuevas áreas	Composición taxonómica y abundancia de especies de insectos acuáticos	Conoce la integridad del ambiente acuático transicional que se esté monitoreando	Biodiversidad y servicios ecosistémicos

Categoría		Impacto	Indicador	Justificación del indicador	Dimensión del indicador (TCNCC)
	Patrones de migración de las aves	Las migraciones podrían comenzar antes debido al calentamiento	Cambios en los periodos habituales de llegada de aves migratorias a humedales	---	Biodiversidad y servicios ecosistémicos
Redes tróficas	Soporte del ecosistema	El sistema de soporte de los ecosistemas se verá afectado si los detritos y las especies se pierden debido a fuertes inundaciones y eventos de escorrentía, y si los niveles de sequía exceden los límites de tolerancia de las especies	Frecuencia y severidad (intensidad) de eventos meteorológicos extremos	Determinar la reducción o no de biomasa y especies por lavado	Recurso hídrico
	Soporte de las redes tróficas	La sequía y las inundaciones contribuyen a la mineralización y liberación de nutrientes de la materia orgánica. Esto puede aumentar la acumulación de nutrientes disponibles para las plantas en los sedimentos	Frecuencia y severidad (intensidad) de eventos meteorológicos extremos	Los grandes eventos de escorrentía permiten identificar el aumento de la eutrofización	Recurso hídrico

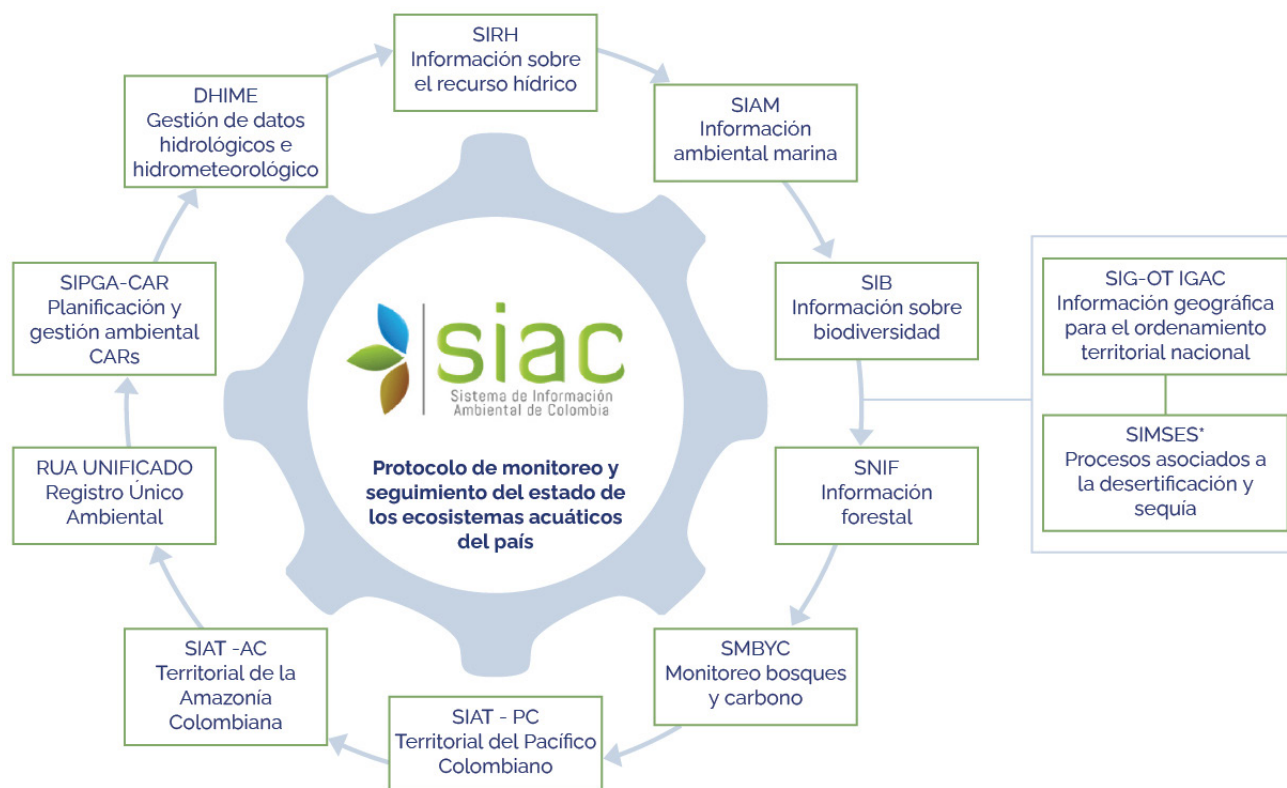
Fuente: Modificado de Kernan et al. (2010).

Sistemas de información ambiental para la evaluación del estado de los ecosistemas acuáticos

A partir de un análisis detallado de la información que ya se produce sobre los ecosistemas acuáticos, que hay en territorio colombiano, y de los requerimientos nuevos para el Promsea, se han identificado los que son operables para una evaluación

integral de los ecosistemas acuáticos (Figura 42). De esta forma no solo se garantiza su validación, sino que se cuenta con herramientas oficiales para el monitoreo y seguimiento.

Figura 42. Sistemas de información ambiental operables con el Promsea



*Nota: * Sistema de procesos asociados a la desertificación y sequía (Simse).*

El Simses tiene como objetivo principal establecer y fortalecer el intercambio, análisis y divulgación de información técnica y de gestión sobre los procesos asociados a la desertificación y sequía. Al momento de redactar esta publicación se encontraba en proceso de construcción, por lo cual el país dispondrá de información sobre la degradación de los suelos.

Adicionalmente, este sistema contempla la inclusión de información relevante para la obtención de indicadores de desempeño y progreso de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (UNCCD, por su sigla en inglés),

así como preguntas específicas para el diagnóstico de su implementación en el país. También recopilará información general sobre la Política para la Gestión Sostenible del Suelo, las metas voluntarias de degradación neutral en Colombia y el Plan de Acción Nacional de Lucha contra la Desertificación y la Sequía (PAN), incluyendo preguntas para su diagnóstico y seguimiento.

Asimismo, el Simses ofrecerá espacios para la carga y descarga de información documental y cartográfica. Allí mismo se ha considerado el desarrollo de un módulo específico para el monitoreo y seguimiento de la degradación de los suelos en Co-

lombia. Su integración con el SIAC y plataformas internacionales como Panorama mundial de los enfoques y tecnologías de conservación (WOCAT) que es una red mundial sobre la gestión sostenible de las tierras lo convierte en un repositorio de

gran potencial: especialmente, en lo relacionado con variables físico-químicas del suelo y aquellas que contribuyen a la generación de indicadores de presión y estado del recurso.

Información dispuesta en los sistemas y otras fuentes de información

La captura, reporte y divulgación de datos sobre la diversidad biológica y los recursos naturales renovables son fundamentales para analizar el estado de los ecosistemas y las presiones que afectan sus dinámicas. El SIAC y otros sistemas de información de diferentes entidades estatales reportan información, a nivel nacional, relacionada con inventarios, seguimiento, evaluación, monitoreo, estrategias de conservación y planes de manejo ambiental en todo el territorio.

En este punto es pertinente tener presente que el SIRH fue creado mediante el Decreto 1323 del 2007, con el propósito de facilitar la articulación de la información sobre el agua generada por el Ideam, las autoridades ambientales y otros sectores (Ideam, 2014). El SIRH permite la integración y estandarización de datos relacionados con la gestión del recurso hídrico, incluyendo bases de datos, estadísticas, modelos y reglamentos. Además, establece puntos de monitoreo de calidad a cargo de cada autoridad ambiental competente, tal como quedó establecido en el Decreto 1640 de 2012, que recomienda la medición periódica de parámetros para evaluar tendencias en el tiempo y tomar acciones preventivas o correctivas.

De manera complementaria, existen sistemas que recopilan datos sobre variables e indicadores físicos, químicos y socioeconómicos, tales como el DHIME, el SIG-OT y el Sistema de Información Ambiental Marina (Siam). Por otro lado, los datos de variables hidrobiológicas se reportan en subsistemas como: el SIB, el Siam, el SIAT-AC y SIAT-PC, entre otros. Algunos de ellos han sido priorizados para el

Promsea, lo que facilita la evaluación de los ecosistemas acuáticos y la recopilación de mediciones en los distintos puntos del monitoreo.

A pesar de estos esfuerzos, los subsistemas siguen operando de manera independiente, con lineamientos distintos en el manejo y gestión de la información, lo que dificulta la interoperabilidad. La ausencia de obligatoriedad en la estandarización de datos geográficos y alfanuméricos ha llevado a que, en algunos casos, la información se registre en bases de datos sin ser publicada ni compartida. Por esta razón, se continuará trabajando bajo los lineamientos del SIAC y sus subsistemas, con el fin de garantizar el cumplimiento de los estándares para la recolección, producción, oficialización y publicación de datos.

Para gestionar la información generada en la implementación del Promsea, se deben considerar cuatro aspectos clave:

- La información debe estar alineada con las necesidades del Promsea.
- Se debe comprender la demanda de información a nivel local, regional y nacional, con especial énfasis en las comunidades asociadas al manejo del recurso hídrico y los ecosistemas acuáticos.
- Los datos deben ser interoperables, generados bajo estándares internacionales de publicación de datos geográficos.

- Se debe garantizar la difusión de la información para que el público y los tomadores de decisiones tengan acceso al estado actual de los ecosistemas acuáticos.

En las ventanas piloto, definidas para la implementación del Promsea, los datos variables e in-

dicadores físicos, químicos, hidrobiológicos y socioeconómicos fueron alineados con los modelos conceptuales de fenómenos de transformación como carga contaminante, fragmentación y cambio climático. Ello con el objetivo de establecer las líneas base para para evaluar la evolución de los ecosistemas acuáticos en el país (Tabla 49).

Tabla 49. *Sistemas de información o bases de datos que albergan las variables priorizadas por fenómeno de transformación para el monitoreo y seguimiento del estado de los ecosistemas acuáticos del país*

VARIABLES DEL FENÓMENO	FENÓMENO DE TRANSFORMACIÓN	SISTEMA DE INFORMACIÓN O BASE DE DATOS
Físicas		
Área superficial	Cambio Climático GEI	Indicadores Ideam: variación de superficie de los ecosistemas naturales continentales
Cambios en la estructura del suelo	Fragmentación	Sin información en los sistemas
Caudales / Niveles	Carga contaminante Fragmentación Cambio Climático GEI	SIRH - DHIME
Caudales sólidos y líquidos de entrada y salida	Cambio Climático GEI Carga contaminante	Anla - Datos del sector hidroeléctrico
Cambios en la línea de costa	Fragmentación	Invemar
Cambios en las propiedades físicas del suelo (densidad aparente, espesor, permeabilidad, entre otras)	Fragmentación	Sin información en los sistemas
Color del suelo (matriz y moteados)	Carga contaminante	SIRH

Variables del fenómeno	Fenómeno de transformación	Sistema de información o base de datos
Compactación del suelo	Fragmentación	Sin información en los sistemas
Composición del lecho	Carga contaminante	
Consistencia del suelo	Fragmentación	
Evapotranspiración / Evaporación	Fragmentación	DHIME
Fondos blandos (marino)	Carga contaminante	Sin información en los sistemas
Radiación solar	Carga contaminante Cambio Climático GEI	DHIME
Nivel freático	Fragmentación	SIG-OT - IGAC
Precipitación	Carga contaminante Fragmentación Cambio Climático GEI	DHIME
Profundidad	Carga contaminante Cambio Climático GEI	Sin información en los sistemas
Sólidos disueltos totales	Carga contaminante	SIRH DHIME Estadística Ideam
Sólidos suspendidos totales	Carga contaminante Fragmentación	DHIME
Temperatura del agua	Carga contaminante Fragmentación Cambio Climático GEI	SIRH - DHIME

Variables del fenómeno	Fenómeno de transformación	Sistema de información o base de datos
Temperatura del ambiente	Carga contaminante Cambio Climático GEI	DHIME
Tiempo de residencia hidráulico	Cambio Climático GEI	Anla - Datos del sector hidroeléctrico
Transparencia	Carga contaminante	Sin información en los sistemas
Turbidez	Carga contaminante	SIRH
Químicas		
Alcalinidad	Carga contaminante	SIRH
Arsénico (metales pesados)	Carga contaminante	SIRH
Biocidas	Carga contaminante	SIRH
Cadmio (metales pesados)	Carga contaminante	SIRH
Carbono orgánico total	Carga contaminante Cambio Climático GEI	SIRH
Cobre (metales pesados)	Carga contaminante	SIRH
Conductividad eléctrica	Carga contaminante	SIRH - DHIME
Cromo (metales pesados)	Carga contaminante	SIRH
Demanda biológica de oxígeno	Carga contaminante	SIRH - DHIME
Demanda química de oxígeno	Carga contaminante	SIRH
Dureza	Carga contaminante	SIRH
Emisiones de CO ₂ y CH ₄	Cambio Climático GEI	SIRH
Fósforo total	Carga contaminante Cambio Climático GEI	SIRH Estadística Ideam

Variables del fenómeno	Fenómeno de transformación	Sistema de información o base de datos
Geología del terreno	Carga contaminante Fragmentación	Igac
Grasas y aceites	Carga contaminante	SIRH
Materia orgánica (concentración y tasa de descomposición)	Carga contaminante Cambio Climático GEI	Sin información en los sistemas
Mercurio (metales pesados)	Carga contaminante	SIRH
Niquel (metales pesados)	Carga contaminante	SIRH
Nitrógeno total	Carga contaminante Cambio Climático GEI	SIRH Estadística Ideam
Oxígeno disuelto	Carga contaminante Cambio Climático GEI	SIRH Estadística Ideam
pH	Carga contaminante Cambio Climático GEI	SIRH Estadística Ideam
Plomo (metales pesados)	Carga contaminante	SIRH
Salinidad	Carga contaminante	SIRH
Zinc (metales pesados)	Carga contaminante	SIRH
Hidrocarburos aromáticos	Carga contaminante	Sin información en los sistemas
Hidrobiológicas		
Algas	Carga contaminante Cambio Climático GEI	SiB - Siam
Aves	Carga contaminante Fragmentación	SiB - GBIF

Variables del fenómeno	Fenómeno de transformación	Sistema de información o base de datos
Bacterias	Cambio Climático GEI	SiB
Bioacumulación	Carga contaminante	Sin información en los sistemas
Clorofila	Carga contaminante Fragmentación Cambio Climático GEI	Sin información en los sistemas
Coliformes termotolerantes	Carga contaminante	SIRH
Corales	Carga contaminante	SiB - SIAM
Macroinvertebrados	Carga contaminante Fragmentación	SiB - SIAM - Siac-Ac
Mamíferos	Fragmentación	Sin información en los sistemas
Moluscos	Carga contaminante	SiB - SIAM
Peces	Carga contaminante Fragmentación	SiB - GBIF
Vegetación acuática	Carga contaminante Fragmentación Cambio Climático GEI	Imágenes satelitales (USGS, ESA, otros) SiB
Vegetación de ribera	Carga contaminante Fragmentación	Imágenes satelitales (USGS, ESA, otros) SiB
Vegetación semiacuática	Carga contaminante Fragmentación Cambio Climático GEI	Imágenes satelitales (USGS, ESA, otros) Simcoba (Sinchi) SiB
Zooplankton	Carga contaminante	SiB

Variables del fenómeno	Fenómeno de transformación	Sistema de información o base de datos
Socioeconómico		
Captaciones	Carga contaminante	SIRH / Anla
Deforestación y aforestación	Carga contaminante Fragmentación Cambio Climático GEI	SMBYC
Población (Tasa de crecimiento anual, Densidad poblacional, Distribución de la población, Caracterización de la población)	Carga contaminante Cambio Climático GEI	Dane
Residuos sólidos en agua y sedimentos	Carga contaminante Fragmentación	Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (Superservicios)
Situación poblacional (cobertura de servicio de tratamiento de aguas residuales)	Carga contaminante Cambio Climático GEI	Superservicios
Situación poblacional (cobertura de servicio de tratamiento de aguas residuales)	Carga contaminante Cambio Climático GEI	Superservicios
Vertimientos	Carga contaminante Cambio Climático GEI	SIRH
Vertimientos (aguas y sedimentos de lastre)	Carga contaminante Cambio Climático GEI	Dimar / CIOH
Uso del suelo	Carga contaminante Fragmentación Cambio Climático GEI	Sin información en los sistemas

Variables del fenómeno	Fenómeno de transformación	Sistema de información o base de datos
Usos del agua	Carga contaminante	SIRH
Usuarios del agua	Carga contaminante	SIRH

Necesidades y proyección

Actualmente, las entidades e institutos de investigación del sector ambiental trabajan con información alfanumérica y datos geográficos tanto del análisis de información secundaria como levantados en campo. No obstante, persisten desafíos en la consulta, acceso y descarga de datos que albergan los sistemas de información respectivos en los diferentes portales. Estas dificultades limitan la disponibilidad y el uso eficiente de la información para la evaluación del estado de los ecosistemas acuáticos.

A continuación, se presentan los principales aspectos identificados en el análisis de los sistemas y subsistemas de información existentes, a nivel nacional. Estos sistemas almacenan y publican datos fundamentales para la caracterización de variables, índices e indicadores empleados en la evaluación de los ecosistemas acuáticos del país.

Validación, gestión y disposición de los datos

La gestión de la información ambiental en el país refleja una organización independiente de las entidades, lo que ha generado un bajo nivel de intercambio de datos. Cada institución se enfoca en sus propios objetivos y, aunque existen sistemas especializados para la gestión y disposición de información temática, estos funcionan de manera aislada, por lo cual se dificulta la integración de herramientas para el manejo de bases de datos, visualización, descarga y análisis.

para la captura y actualización de datos, definir plazos que garanticen la vigencia de la información utilizada en la toma de decisiones e implementar mecanismos de control de calidad, para la validación de registros, y que de esta forma se evite la duplicidad, las inconsistencias u omisiones.

Para reducir los errores derivados de la recolección heterogénea de datos, por parte de los diferentes actores, es fundamental establecer lineamientos que permitan fortalecer el equipo humano encargado de la gestión de información. Asimismo, se debe consolidar una infraestructura adecuada

Una de las principales diferencias entre los sistemas de información radica en los formatos utilizados para almacenar y compartir los datos. En algunos casos, se emplean bancos de datos con interfaces estandarizadas y de libre acceso, pero en otros no es así. El uso de formatos abiertos, como archivos de texto (TXT) o valores separados por comas (CSV), facilita la interoperabilidad entre sistemas y permite una mayor disponibilidad y accesibilidad de la información ambiental.

Representación de los datos

Debido a que existe una gama amplia de programas de aplicación específicos para la representación de los datos, debe ser clara la forma que se determine para que el usuario final comprenda a qué tipo de variable o indicador se hace referencia y cómo los datos descargados pueden ser revisados y analizados. Por ejemplo, para el análisis multicriterio para tareas de la planificación, el ordenamiento territorial, publicación de listados de especies o herramientas para la modelación de la distribución, se establecen lineamientos a partir de los que se definen los formatos de publicación y se identifica el sistema en que deben ser publicados.

De esa manera, se eliminarían los problemas de intercambio de datos que se generan cuando se trabaja sin coordinación ni lineamientos. Lo mejor es contar con una interfaz fija entre los sistemas involucrados, en la que se organice y presente la información, de forma idónea, cumpliendo con las expectativas del usuario final, que en este caso son profesionales de las autoridades ambientales encargados de hacer actividades de monitoreo y

seguimiento del estado de los ecosistemas acuáticos.

Una vez identificada la necesidad de contar con una representación adecuada de los datos, se proyecta que aquellos sistemas que disponen información apta para el Promsea, garanticen:

- El sistema debe funcionar con capacidad para múltiples usuarios, garantizando que se acceda y se manipulen los datos, con la trazabilidad de consultas y descargas.
- Los datos tienen que ser presentados de manera específica, según contexto y finalidad. Y deben contar con prospectiva para que las variables sean relevantes para varias consultas.
- Cada transacción tiene que llevar a un banco de datos consistente, con lo que se define si es una representación correcta de los datos e información consultada.

Necesidades de articulación entre sistemas: interoperabilidad

Para que la propuesta del Promsea sea viable, es necesario que los sistemas de información ambiental establezcan y mantengan un diálogo continuo con puntos de articulación estratégicos que garanticen la generación y actualización de información validada a nivel nacional. Este proceso de integración permitirá consolidar datos confiables y homogéneos.

Un ejemplo de este enfoque es la articulación entre los sistemas SIRH y SIB Colombia, cuyo trabajo conjunto facilitará la publicación de nuevos listados de referencia para diversos grupos biológicos, incluyendo fitoplancton, algas perifíticas, zooplancton, macroinvertebrados y vegetación ribereña (Figura 43).

Figura 43. Ejemplo del proceso de interoperabilidad entre los sistemas de información ambiental del país



Es así como, para la interoperabilidad, se deben tomar en cuenta los siguientes criterios:

- Que la interoperabilidad de los sistemas represente una base importante para el uso amplio y adecuado de los datos referentes al

monitoreo y seguimiento del estado de los ecosistemas acuáticos.

- Que la interoperabilidad sea alcanzable, a través de la estandarización.

Integración entre los sistemas de información y los SIG

Debido a la complejidad inherente a la creación de un sistema de información, la arquitectura de los sistemas que manejan datos alfanuméricos y geográficos debe diseñarse de manera que inte-

gre funciones para la gestión eficiente de todo tipo de datos. Esto incluye, el desarrollo de una interfaz óptima que facilite el acceso y la consulta de la información de manera ágil y estructurada.

Cuando se plantea la integración de datos geográficos en un sistema ya existente, se logra una mayor completitud en la presentación de información relevante para el monitoreo y seguimiento del estado de los ecosistemas acuáticos. Para ello, los SIG deben adaptarse a las tecnologías de la información disponibles, lo que se consigue mediante la estandarización y adecuaciones tecnológicas en las plataformas involucradas. Estas adaptaciones deben alinearse con:

- Georreferenciación, para la organización de datos en un único banco de datos con fines analíticos.
- Análisis geográfico y visualización, para representar y comprender las relaciones entre las variables monitoreadas.
- Automatización de procesos, para integrar datos y métodos geográficos, de modo que se cumpla con los estándares para la gestión y publicación de información geográfica.

Requerimientos identificados para el componente de geomorfología y suelos

En el caso del monitoreo de suelos, prácticamente todas las variables asociadas a cambios requieren la toma de datos en campo, ya que dependen de mediciones directas para garantizar su precisión. A nivel nacional, existe información sobre el contenido de COS, esta genera inseguridad porque ha sido obtenida a partir de modelos y estimaciones basadas en datos de distintas épocas. No obstante, hoy hay mapas elaborados por diferentes fuentes, como el Mecanismo Global, utilizado en el Programa de Neutralidad de la Degradación de las Tierras, la FAO (2017) y el Igac (2018). Estos son modelos predictivos, por eso es fundamental establecer una línea base con mediciones directas que permitan evaluar, con mayor certeza, los cambios en los ecosistemas.

En este contexto, se vuelve fundamental que la información geográfica esté disponible bajo los estándares establecidos por los organismos internacionales especializados en el procesamiento de datos geoespaciales, como: el *Open Geospatial Consortium* (OGC), la *International Standardization Organisation* (ISO), el *Comité Européen de Normalisation* (CEN) y los gremios nacionales de estandarización.

Para garantizar la estandarización y calidad de la información, es necesario establecer mecanismos que permitan la publicación de datos confiables y precisos. Esto implica definir técnicas adecuadas de exportación, conversiones correctas entre formatos, acceso eficiente a los datos y procesos de retroalimentación con los distintos actores que utilizan el SIAC y otros subsistemas de información. A su vez, se propone el establecimiento de un tesoro de palabras clave para indexar y recuperar información de los diferentes portales de datos.

El Programa de Monitoreo de Degradación de Suelos ya cuenta con puntos de monitoreo, al igual que el Inventario Forestal Nacional, lo que representa una oportunidad para la estimación del carbono de referencia en suelos. Dado que estos sistemas incluyen mediciones directas y consideran múltiples variables, podrían ser utilizados como insumos clave para fortalecer el monitoreo del carbono en suelos dentro del Promsea (ver Tabla 50 que relaciona los insumos existentes). No obstante, para integrar esta información en el análisis, será necesario realizar un proceso previo de identificación y selección de los puntos de monitoreo, asegurando que estos correspondan específicamente a las zonas de interés dentro de los ecosistemas acuáticos.

Tabla 50. Relación de insumos existentes y requeridos en geomorfología y suelos

Tema	Existentes	Requeridos
Cartografía Geomorfología y suelos	Mapa de geopedología (lgac)	Ajuste con la actualización del mapa de correlación de suelos (lgac)
	Mapas departamentales	Mapa de suelos hidromórficos (lgac)
Metodologías	Metodología para elaboración de mapas de geomorfología (procesos Morfodinámicos) a escala 1 : 100.000 (Ideam)	
	Protocolo para identificación y evaluación de degradación de suelos por erosión (Ideam)	Protocolos para compactación y otros procesos
	Protocolo para identificación y evaluación de degradación de suelos por erosión (Ideam)	
	Homologación de suelos Departamento de Agricultura de Estados Unidos, (USDA, por su sigla en inglés) – IPCC	Ajuste de la metodología para suelos de ecosistemas de humedales
	Hoja de Ruta para estimación de C y GEI en páramos y humedales (lgac, Instituto Humboldt)	Ajuste metodológico por parte del grupo AFOLU para estimación de C y GEI



Choco - Río Atrato



Caño Correa. Canal del Dique María la Baja - Bolívar



Hoja de Ruta para la implementación del Promsea en ventanas piloto

La fase III del Promsea se centra en la consolidación de la estrategia de implementación y validación, para lo cual se han construido lineamientos preliminares que establecen los aspectos prioritarios para garantizar su ejecución. Esta propuesta define la hoja de ruta para la selección de ventanas piloto de implementación, a nivel nacional y regional, asegurando que el monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos sea un proceso sistemático y sostenible en el tiempo.

Para comprender este proceso, es fundamental diferenciar entre monitoreo y seguimiento. El monitoreo implica la medición, a largo plazo, de características ambientales para determinar el estado y las tendencias en la calidad ambiental (Noon, 2003). Mientras que, el seguimiento corresponde a los análisis realizados con los datos obtenidos del monitoreo, que hayan sido recolectados de manera sistemática y continua en, al menos, dos periodos (Ideam y Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales [UDCA], 2015).

En un primer momento, se deberá evaluar la calidad y disponibilidad de la información existente sobre los ecosistemas priorizados; es decir, definir la línea base. Para que esta sea útil en el desarrollo de indicadores, el monitoreo debe realizarse durante, al menos, cinco años consecutivos. Si no se cumple este requisito, será necesario implementar un levantamiento inicial de datos desde un momento cero, y garantizar su sostenibilidad en el corto, mediano y largo plazo. Este enfoque sistemático permitirá validar las metodologías propuestas, analizar y evaluar los fenómenos de transformación, periódicamente, en las ventanas piloto y, determinar cómo estos afectan la dinámica de los ecosistemas acuáticos, facilitando la adopción de medidas de control y gestión adecuadas.

Con base en lo anterior, se han identificado los pasos prioritarios para la implementación y validación de las metodologías del Promsea:

- Identificación de criterios nacionales de priorización para la selección de los ecosistemas a monitorear, permitiendo ajustes metodológicos e inclusiones a nivel regional, según nuevos insumos relevantes.
- Definición de una hoja de ruta para la clasificación de subzonas hidrográficas y unidades ambientales costeras, considerando actividades y tendencias socioeconómicas.
- Establecimiento de lineamientos mínimos para la revisión y análisis del estado de la información con el fin de seleccionar ventanas piloto de implementación en áreas priorizadas.
- Identificación de actores clave y posibles acuerdos interinstitucionales para la implementación y validación del protocolo.
- Propuesta de lineamientos mínimos para la inclusión de procesos de Monitoreo Comunitario Participativo (MCP) como parte de la estrategia de implementación y validación del Promsea.

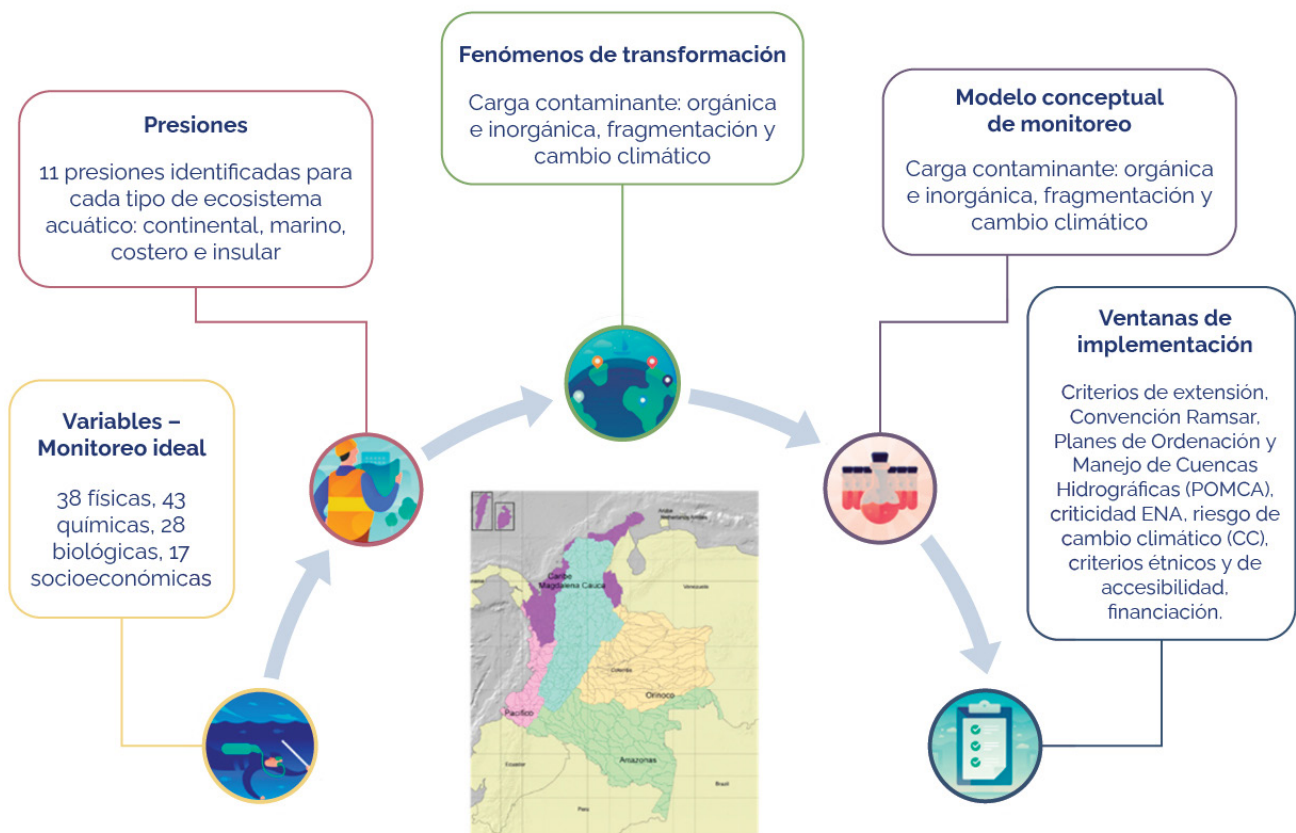
Finalmente, para garantizar la consolidación de este proceso, se requiere la participación activa de autoridades ambientales, centros e institutos de investigación, la academia y otras entidades involucradas en la generación de conocimiento, gestión y ejecución de iniciativas de monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos del país.

Consolidación de la estrategia de implementación y validación del protocolo, a nivel regional y nacional

Con el inicio del proceso de implementación del Promsea, esta herramienta entra en una fase en la que todas las propuestas metodológicas serán aplicadas en el territorio, permitiendo su validación y ajuste, según la realidad de los ecosistemas priorizados a nivel nacional. Este proceso garanti-

zará que las metodologías desarrolladas se adapten a las condiciones específicas de cada región, fortaleciendo su aplicabilidad y eficacia en la evaluación y seguimiento del estado de los ecosistemas acuáticos del país (ver Figura 44).

Figura 44. Propuesta metodológica del Promsea



De acuerdo con lo anterior, y con el fin de facilitar la consolidación de la Fase III del proceso, se diseñó una hoja de ruta general que considera los pasos mínimos a desarrollar para lograr la implementa-

ción y validación del Promsea, en ventanas piloto. Estos se exponen en la Figura 45 y más adelante se desarrollan.

Figura 45. Pasos mínimos para la implementación y validación del Promsea, en ventanas piloto



Priorización de las unidades de análisis (subzonas hidrográficas y unidades ambientales costeras) para la implementación y validación del Promsea

Para la identificación y priorización de unidades de análisis en el monitoreo y seguimiento del estado de los ecosistemas acuáticos, se diseñó una metodología escalonada, basada en la integración de insumos oficiales generados periódicamente. Esta estrategia permite consolidar información cartográfica temática de escala nacional, garantizando un enfoque estructurado y alineado con los objetivos del Promsea. La metodología considera diversas fuentes de información que permiten identificar

y caracterizar los ecosistemas acuáticos de interés. Los principales insumos cartográficos utilizados incluyen:

- Mapa de Ecosistemas Continentales, Costeros y Marinos de Colombia (escala 1 : 100.000): Proporciona la base para la identificación y delimitación de ecosistemas acuáticos en el territorio nacional.

- Humedales listados en la Convención Ramsar: Identifica humedales de importancia internacional y su extensión dentro del territorio colombiano.
- Cuencas priorizadas por autoridades ambientales: Permite focalizar esfuerzos en ecosistemas estratégicos sujetos a planes de manejo y conservación.
- Subzonas hidrográficas con altos niveles de criticidad: Basadas en la evaluación integrada del agua, estas áreas reflejan problemáticas relacionadas con disponibilidad, calidad y demanda del recurso hídrico.
- Zonas de alto riesgo frente al cambio climático: Identifica áreas vulnerables a eventos

climáticos extremos y a los impactos derivados del cambio, en los patrones de precipitación y temperatura.

- Presencia o pretensiones territoriales de grupos étnicos y comunidades campesinas: Considera el impacto social y cultural en la gestión y conservación de los ecosistemas acuáticos.

A partir de estos criterios, se definieron las fuentes cartográficas y las metodologías de integración para la selección y priorización de unidades de análisis, garantizando un enfoque basado en datos oficiales, con alto nivel de precisión y aplicabilidad a nivel nacional.

Criterios para la priorización de unidades de análisis: subzonas hidrográficas y unidades ambientales costeras

Criterio de priorización de las unidades de análisis por extensión

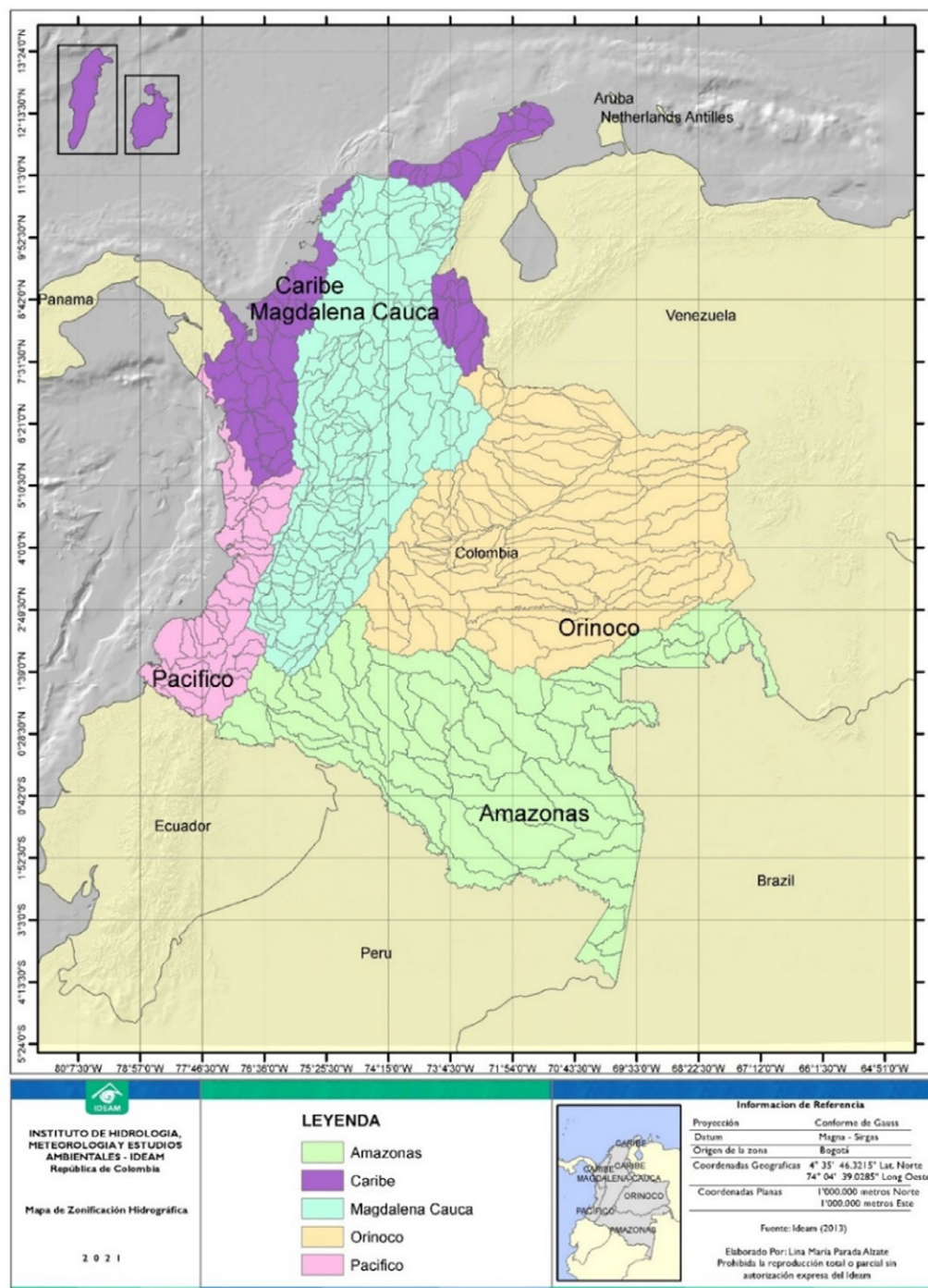
Se identificó como criterio inicial, para la priorización de unidades de análisis, la representatividad de los ecosistemas acuáticos en términos de extensión. A continuación, se presentan los insumos principales y la metodología para el análisis de los ecosistemas acuáticos priorizados de acuerdo con este criterio, en dos escalas de trabajo.

Mapa de Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia, escala 1 : 500.000

De acuerdo con la zonificación y codificación de cuencas hidrográficas realizada para el país a escala 1 : 500.000 (Ideam, 2013a), se establecieron tres niveles de jerarquía: áreas, zonas y subzonas hidrográficas (Figura 46). En este sentido, el Promsea adopta esta zonificación como referente para la división del territorio nacional, lo que permite

identificar y priorizar los ecosistemas acuáticos en cada área hidrográfica, zona y subzona. Este enfoque garantiza coherencia con la gestión hídrica nacional y facilita la integración de los ecosistemas acuáticos en los procesos de monitoreo, evaluación y toma de decisiones ambientales.

Figura 46. Mapa zonificación hidrográfica del país (áreas hidrográficas)



Fuente: Ideam (2013a).

MEC, escala 1 : 100.000, más actualizado disponible

Como línea base para la selección de unidades de análisis se debe partir del MEC a escala 1 : 1 00.000, más actualizado disponible (Ideam *et al.*, 2020). Este es el mapa oficial, a nivel nacional, que presenta la clasificación de los ecosistemas acuáticos y terrestres identificados bajo una metodología concertada

entre las instituciones del SINA. Este mapa involucra aspectos de clima, geopedología, coberturas de la tierra, unidades bióticas y paisajes marinos, los cuales son fundamentales para el proceso de delimitación de ecosistemas acuáticos.

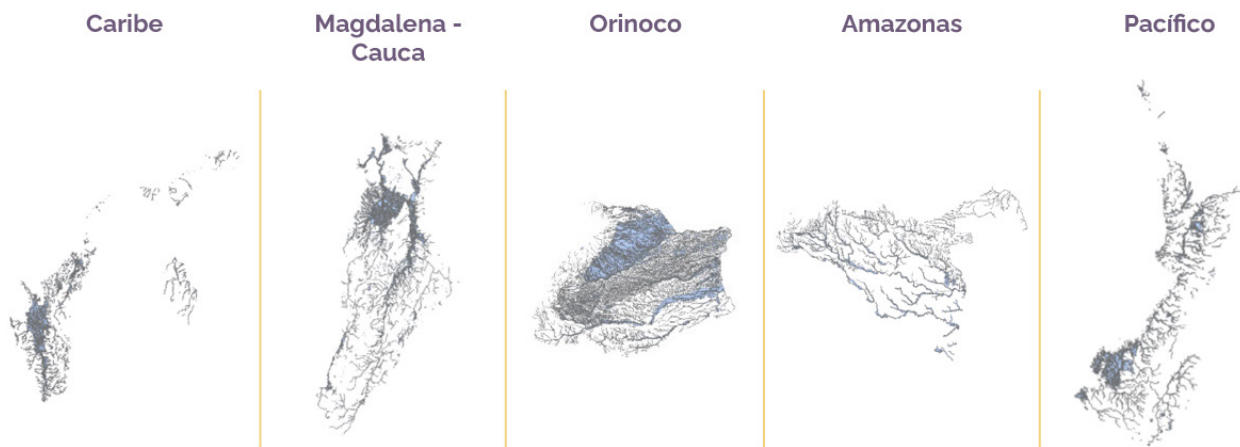
Metodología de análisis para el criterio de extensión

Para llevar a cabo el análisis, el primer paso es realizar una revisión de los ecosistemas acuáticos identificados en el MEC. Para ello, se debe generar una nueva capa geográfica, seleccionando, exclusivamente, los ecosistemas clasificados como acuáticos, mediante un proceso de selección por atributos.

Una vez identificados estos ecosistemas, se procede a realizar un corte geoespacial en función de las

cinco áreas hidrográficas de Colombia (ver Figura 47), tomando como referencia la capa de zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas (Ideam, 2013a). Este procedimiento permite analizar la distribución de los ecosistemas acuáticos dentro de cada área hidrográfica, facilitando la identificación de patrones espaciales y la definición de unidades de monitoreo y seguimiento.

Figura 47. Capas generadas a partir de la extracción de ecosistemas acuáticos por área hidrográfica



Fuente: Ideam (2017).

Para cada una de las capas geográficas generadas, se calcula el área en hectáreas (ha), según la clasificación (lóticos, lénticos y transicionales) de los tipos de ambientes acuáticos definidos en el MEC (ver Tabla 51). El análisis, a nivel nacional, revela que la mayor ocupación de ecosistemas acuáticos se encuentra en el área hidrográfica del Orinoco,

que abarca un 52,20 % del total, seguida por el Amazonas con un 17,87 % y la cuenca Magdalena – Cauca con un 15,91 %. Estos datos reflejan la predominancia de grandes humedales, ríos y planicies de inundación en estas regiones, lo que resalta su importancia en términos de monitoreo y conservación.

Tabla 51. Áreas calculadas por área hidrográfica para los ecosistemas acuáticos

Área hidrográfica	Tipo de ecosistema	Ambiente acuático	Porcentaje
Caribe	Acuático (epicontinental)	Lentico	0,3262 %
		Lotico	0,4922 %
		Transicional	5,7500 %
	Costero	Lentico	0,0672 %
		Transicional	0,6550 %
	Insular	Transicional	0,0009 %
	Marino	N. A.	0,7056 %
Magdalena - Cauca	Acuático (epicontinental)	Lentico	3,0446 %
		Lotico	1,5264 %
		Transicional	10,5033 %
	Costero	Lentico	0,4002 %
		Transicional	0,4258 %
	Marino	N. A.	0,0081 %
Orinoco	Acuático (epicontinental)	Lentico	0,5086 %
		Lotico	2,8844 %
		Transicional	48,8111 %

Área hidrográfica	Tipo de ecosistema	Ambiente acuático	Porcentaje
Amazonas	Acuático (epicontinental)	Lentico	0,1577 %
		Lotico	2,1930 %
		Transicional	15,5209 %
Pacífico	Acuático (epicontinental)	Lentico	0,0478 %
		Lotico	0,8329 %
		Transicional	3,1507 %
	Costero	Lentico	0,0004 %
		Transicional	1,9219 %
	Marino	N. A.	0,0651 %
TOTAL			100 %

A continuación del análisis general de los ecosistemas acuáticos por área hidrográfica, es necesario realizar una clasificación más detallada. Para ello, se revisan los ecosistemas acuáticos de acuerdo con la clasificación de tipos de ecosistemas síntesis del MEC, permitiendo una mejor diferenciación de los ambientes presentes en el país.

Como parte de este proceso, se identifican y seleccionan las unidades con mayor representatividad en términos de extensión, dentro de cada área hidrográfica. Estas unidades priorizadas se toman como referencia para el monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos del país (Tabla 52).

Tabla 52. Ecosistemas acuáticos síntesis priorizados para cada área hidrográfica

Área hidrográfica	Ecosistemas síntesis	Área (ha)	Porcentaje
Caribe	Transicional transformado	608.631,51	34,45 %
	Bosque inundable	431.165,15	24,41 %
	Herbazal inundable	155.696,70	8,81 %
	Río	108.196,08	6,12 %

Área hidrográfica	Ecosistemas síntesis	Área (ha)	Porcentaje
Magdalena - Cauca	Transicional transformado	1.530.082,01	43,66 %
	Laguna	619.898,15	17,69 %
	Zona pantanosa	563.400,76	16,07 %
	Río	333.840,95	9,52 %
Orinoco	Sabana inundable	4.873.976,30	42,38 %
	Bosque inundable	4.467.371,03	38,84 %
	Transicional transformado	1.284.618,04	11,17 %
	Río	635.485,38	5,53 %
Amazonas	Bosque inundable	2.782.158,72	24,19 %
	Transicional transformado	546.800,87	4,75 %
	Río	483.153,07	4,20 %
	Herbazal inundable	45.927,62	0,40 %
Pacífico	Transicional transformado	362.447,23	27,33 %
	Bosque inundable	304.521,48	22,96 %
	Manglares y guandales	296.777,00	22,38 %
	Río	183.506,24	13,84 %

A pesar de que la mayor ocupación del territorio nacional la presentan los ambientes de tipo transicional y sus ecosistemas síntesis asociados, no es suficiente contar con este criterio. Hay ecosistemas que, aunque no representan una gran área del territorio, han de ser priorizados dadas sus caracterís-

ticas estratégicas o su riesgo de transformación. De acuerdo con lo anterior, en las secciones siguientes se describen los demás criterios propuestos para la priorización de unidades de análisis para el monitoreo de ecosistemas acuáticos en las diferentes áreas hidrográficas del país.

Criterios para la identificación de ecosistemas estratégicos

Humedales Ramsar

En el proceso de priorización de las unidades de análisis, para el monitoreo de ecosistemas acuáticos, es necesario usar datos geográficos actualizados para la selección de ecosistemas estratégicos. En este contexto, la capa geográfica de los humedales Ramsar constituye uno de estos insu-

mos. Dicha capa se actualiza periódicamente, porque Colombia debe cumplir con los compromisos de la Convención Ramsar. Actualmente, Colombia cuenta con 12 humedales designados como sitios Ramsar, formalizados mediante actos administrativos, los cuales se presentan en la Tabla 53.

Tabla 53. Humedales declarados como sitios Ramsar de Colombia

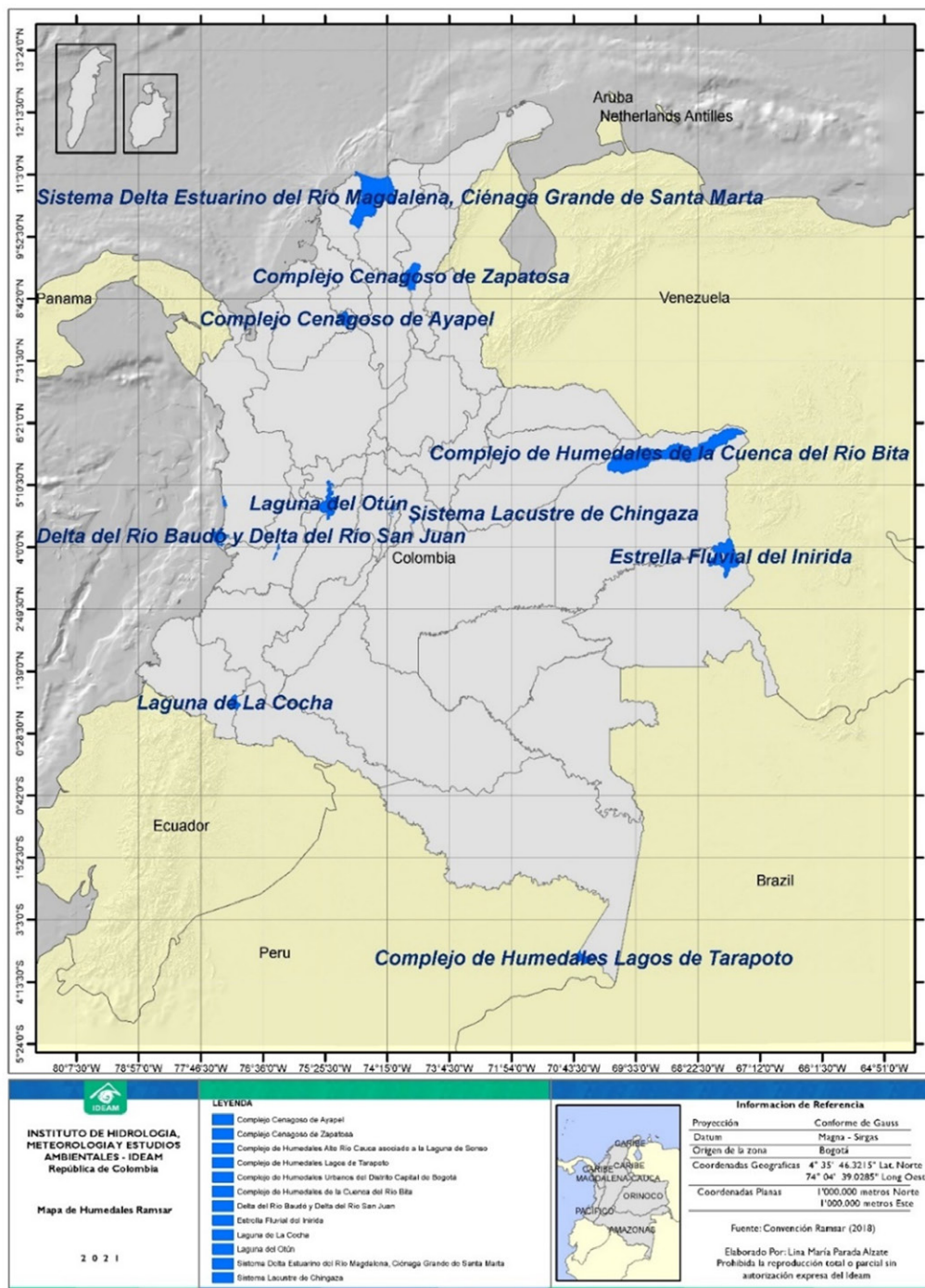
	Área Hidrográfica	Humedal Ramsar	Acto administrativo	Escala	Área (ha)
1	Pacífico	Delta del río Baudó y Delta del río San Juan	Decreto 1667 de 2002	1 : 100.000	52345,93
2	Orinoco	Sistema Lacustre de Chingaza	Decreto 233 de 30 de enero de 2008	1 : 100.000	4072,74
3	Magdalena-Cauca	Sistema Delta Estuarino del río Magdalena, Ciénaga Grande de Santa Marta	Decreto 3888 de 8 de octubre de 2009	1 : 100.000	520846,56
4	Amazonas	Laguna de La Cocha	D.698/00 Mod. Decreto 813 del 28 de abril 2014	1 : 100.000	40032,57
5	Orinoco	Estrella Fluvial del Inírida	Decreto 1275 de 08 de julio de 2014	1 : 100.000	250158,91
6	Magdalena-Cauca	Laguna del Otún	Decreto 250 de 14 de febrero de 2017	1 : 100.000	115883,09

	Área Hidrográfica	Humedal Ramsar	Acto administrativo	Escala	Área (ha)
7	Magdalena-Cauca	Complejo de Humedales Alto río Cauca asociado a la Laguna de Sonso	Decreto 251 de 14 de febrero de 2017	1 : 100.000	5532.67
8	Amazonas	Complejo de Humedales Lagos de Tarapoto	Decreto 1573 del 28 de septiembre de 2017	1 : 100.000	45463.96
9	Magdalena-Cauca	Complejo Cenagoso de Ayapel	Decreto 356 de 22 de febrero de 2018	1 : 25.000	54376.78
10	Magdalena-Cauca	Complejo Cenagoso de Zapatosa	Decreto 1190 de 12 de julio de 2018	1 : 25.000	121725.01
11	Orinoco	Complejo de Humedales de la Cuenca del río Bitá	Decreto 1235 de 18 de julio de 2018	1 : 100.000	824535.77
12	Magdalena-Cauca	Complejo de Humedales Urbanos del Distrito Capital de Bogotá	Decreto 1468 de 6 de agosto de 2018	1 : 10.000 1 : 15.000	666.85

Fuente: MinAmbiente y Convención Ramsar (2018).

Para el análisis realizado en este documento, se ha utilizado la versión más reciente, disponible de esta capa geográfica, correspondiente al año 2018 (Figura 48).

Figura 48. Humedales Ramsar de Colombia



Fuente: MinAmbiente y Convención Ramsar (2018).

Cuencas y unidades ambientales costeras prioritizadas con fines de ordenación por las autoridades ambientales regionales

La priorización de las cuencas hidrográficas en Colombia es un proceso que permite para establecer su ordenación y manejo adecuado, responsabilidad de las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible, conforme a lo estipulado en el Decreto 1640 de 2012. Esta priorización permite definir el orden en que deben formularse los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (Pomca), a nivel de subzona hidrográfica o en niveles inferiores, dentro de la jurisdicción de cada Corporación. Además, incorpora el análisis de conflictos de uso y aprovechamiento de los recursos naturales renovables, la identificación de ecosistemas estratégicos que requieren protección y conservación y, el análisis de condiciones de riesgo ambiental (MinAmbiente, 2014).

Para llevar a cabo esta priorización, se utilizan criterios alineados con los objetivos de la PNGIRH, los cuales se agrupan en cinco categorías principales:

- Oferta hídrica, incluye la presencia de ecosistemas estratégicos.
- Demanda de agua, considera los diferentes usos del recurso.
- Calidad del agua, evalúa el estado y las posibles fuentes de contaminación.
- Riesgo hídrico, analiza amenazas y vulnerabilidades asociadas a la gestión del recurso.
- Fortalecimiento institucional y gobernabilidad, prioriza condiciones críticas que requieran intervención inmediata.

Para la aplicación del modelo de priorización, se utiliza información geoespacial a distintas escalas (1 : 500.000, 1 : 100.000, 1 : 25.000), dependiendo de la disponibilidad y precisión de los datos en cada área hidrográfica (MinAmbiente, 2014). Sin embargo, es importante destacar que la valoración de los factores y parámetros del modelo dependen, en gran medida, de la disponibilidad y representatividad de la información espacial.

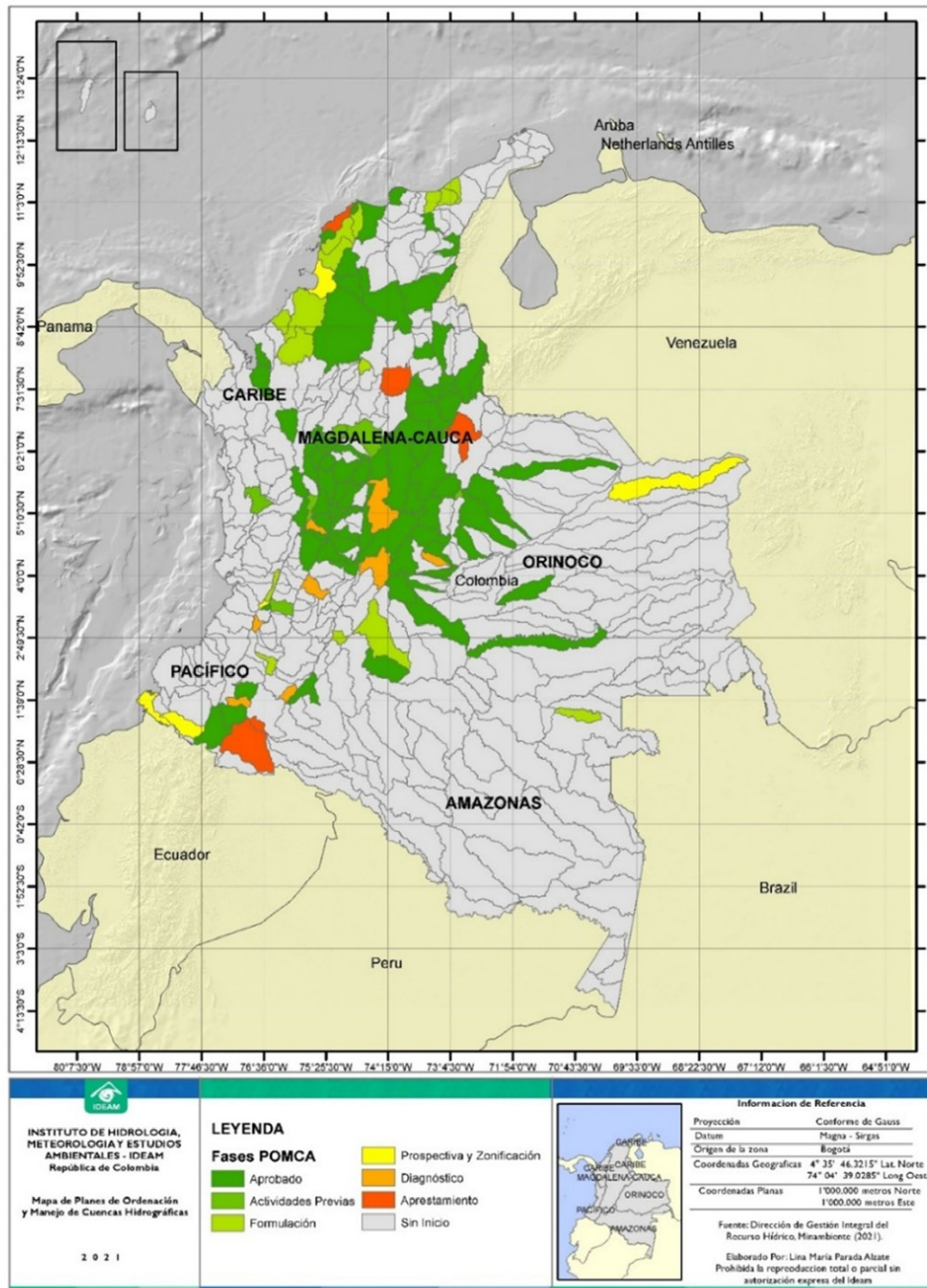
A partir de la calificación de los componentes mencionados, se priorizan:

- Cuencas con alta oferta hídrica y presencia de ecosistemas estratégicos.
- Cuencas con alta demanda, problemas de calidad y riesgo hídrico.
- Cuencas con necesidades urgentes de fortalecimiento institucional y gobernabilidad en contextos críticos (MinAmbiente, 2014).

Una vez identificadas las cuencas que requieren un manejo integrado, se procede con la implementación de los Pomca (Figura 49), siguiendo criterios y metodologías específicas.

El marco metodológico abarca diversas etapas que culminan con la formulación y aprobación de cada Pomca, conforme a los lineamientos establecidos (Tabla 54).

Figura 49. Mapa cuencas priorizadas para ordenamiento



Fuente: MinAmbiente (2021).

Tabla 54. Número de programas, según las fases de desarrollo de los planes de ordenamiento y manejo de cuencas priorizadas, por área hidrográfica del país

Área Hidrográfica	Sin Inicio	Actividades Previas	FASES				
			Apresta- miento	Diagnóstico	Prospectiva y Zonificación	Formulación	Aprobado / Ejecución
Caribe	41	1	1	---	1	6	8
Magdalena- Cauca	87	4	2	6	1	7	50
Orinoco	67	1	---	1	1	1	15
Amazonas	57	---	2	---	---	1	1
Pacífico	31	---	---	1	2	---	3

Fuente: MinAmbiente (2021).

Por otra parte, en lo que respecta a los Planes de Ordenación y Manejo Integrado de la Unidad Ambiental Costera (Pomiuac), es importante destacar que, en el marco de las directrices de la política pública y lo establecido en el artículo 207 de la Ley 1450 de 2011, se expidió el Decreto 1120 del 31 de mayo de 2013. Allí se reglamentan las Unidades Ambientales Costeras (UAC) y las comisiones conjuntas, se establecen las reglas de procedimiento y los criterios para restringir ciertas actividades en pastos marinos, y se dictan otras disposiciones. Su objetivo es delimitar las diez unidades de ordenación y manejo de la zona costera nacional, a partir de las UAC, y establecer el Pomiuac como el instrumento de planificación que define y orienta la ordenación y manejo ambiental de estas zonas del territorio colombiano (MinAmbiente, 2021).

En este sentido, mediante la Resolución 768 de 2017, se adoptó la Guía Técnica para la Ordenación y Manejo Integrado de la Zona Costera. Asimismo, la Resolución 1979 de 2017 estableció la Guía Técnica para la Ordenación, Ordenamiento y Planificación de la Unidad Ambiental Costera Caribe Insular, y formalizó el Plan de Ordenación y Manejo Integrado de la Unidad Ambiental Costera Caribe Insular, mediante el Decreto 415 de 2017. La reglamentación de las UAC ha impulsado a las doce corporaciones autónomas regionales costeras, a PNN y a las autoridades de los grandes centros urbanos costeros a generar acciones orientadas al ordenamiento de 24.571.740 ha de zonas costeras del país (MinAmbiente, 2021).

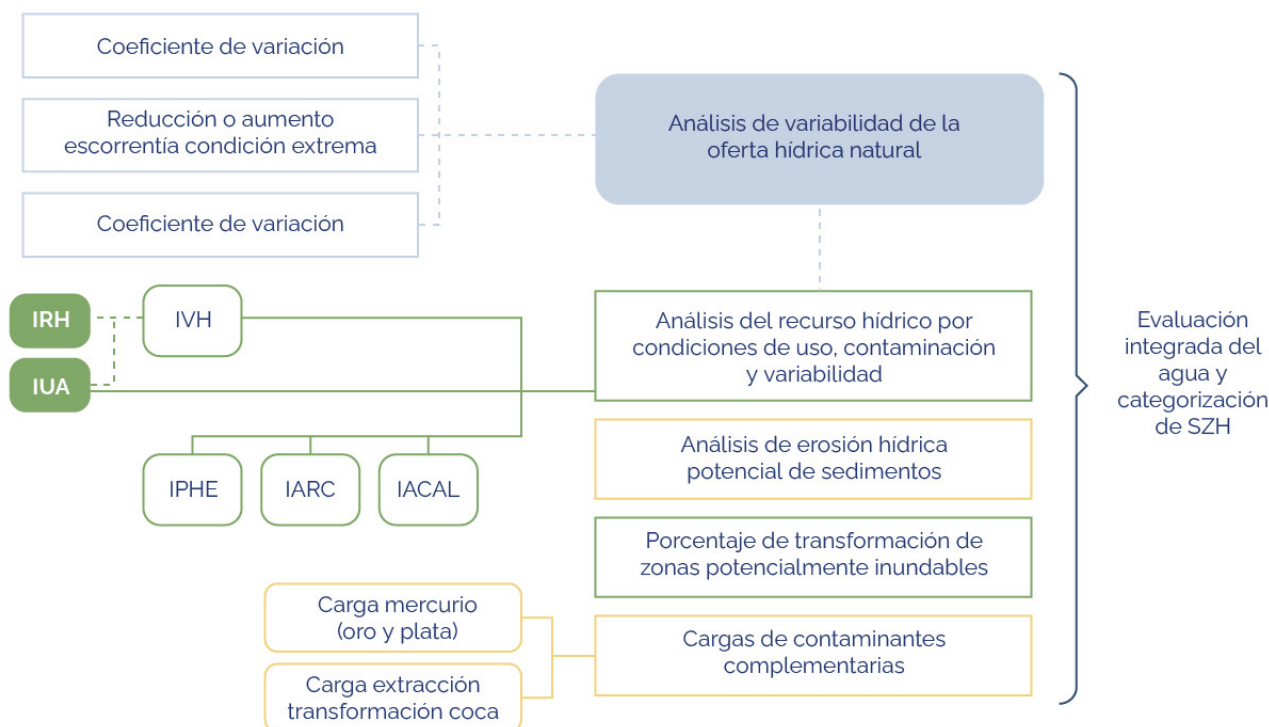
Criterios para la identificación de ecosistemas en riesgo de transformación

Categorización de subzonas hidrográficas por evaluación integrada del agua

Los Estudios Nacionales del Agua (ENA), liderados por el Ideam, se realizan cada cuatro años y analizan el recurso hídrico a partir de la definición de unidades espaciales, basadas en la zonificación hidrográfica del país (Ideam, 2019a). Esta metodología facilita la evaluación y el seguimiento de las aguas superficiales y los sistemas de acuíferos asociados a las áreas, zonas y subzonas hidrográficas. Cada ENA se ha consolidado como un insumo

para la planificación territorial y la toma de decisiones, al proporcionar información clave sobre la distribución, estado, dinámica y presiones que afectan los sistemas hídricos, tanto en términos de cantidad como de calidad (ver Figura 50). Además, permite determinar las potencialidades y restricciones de los servicios ecosistémicos a partir del cálculo de diferentes índices y análisis específicos (Ideam, 2019).

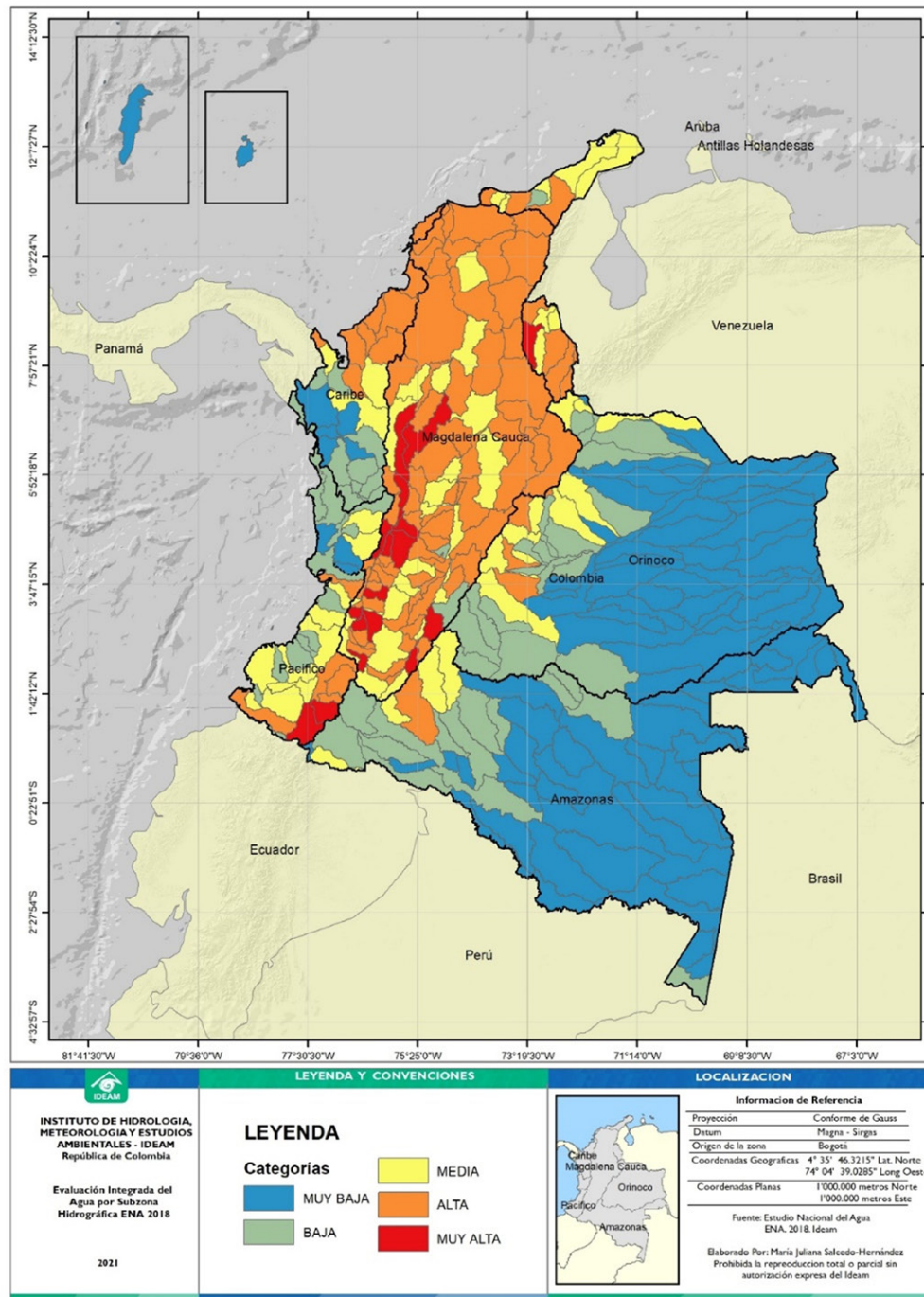
Figura 50. Esquema metodológico para la categorización de subzonas hidrográficas, por evaluación integrada del agua



Nota: Las siglas usadas corresponden así: Índice de Uso del Agua (IUA), Índice de regulación hídrica (IRH), Índice de Vulnerabilidad Hídrica al Desabastecimiento (IVH), Índice de Presión Hídrica sobre los Ecosistemas (IPHE), Índice de Agua no Retornada a la Cuenca (IARC) y el Índice de Alteración potencial de la Calidad del Agua (IACAL).

Fuente: Ideam (2019a).

Figura 51. Mapa Categorización de Subzonas Hidrográficas, según evaluación integrada del agua



Nota: Estudio Nacional del agua, 2018.

Fuente: Ideam, 2019a.



Canal del Dique - Calamar, Bolívar.

En relación con la evaluación integrada del agua a nivel nacional, el ENA establece un análisis para la priorización de ecosistemas acuáticos en riesgo de transformación y sujetos a monitoreo (ver Figura 51). Este análisis integra diversas variables, como la variabilidad de la oferta hídrica en condiciones naturales (VOH), la vulnerabilidad del recurso hídrico debido a presiones antrópicas (VRH), el IACAL

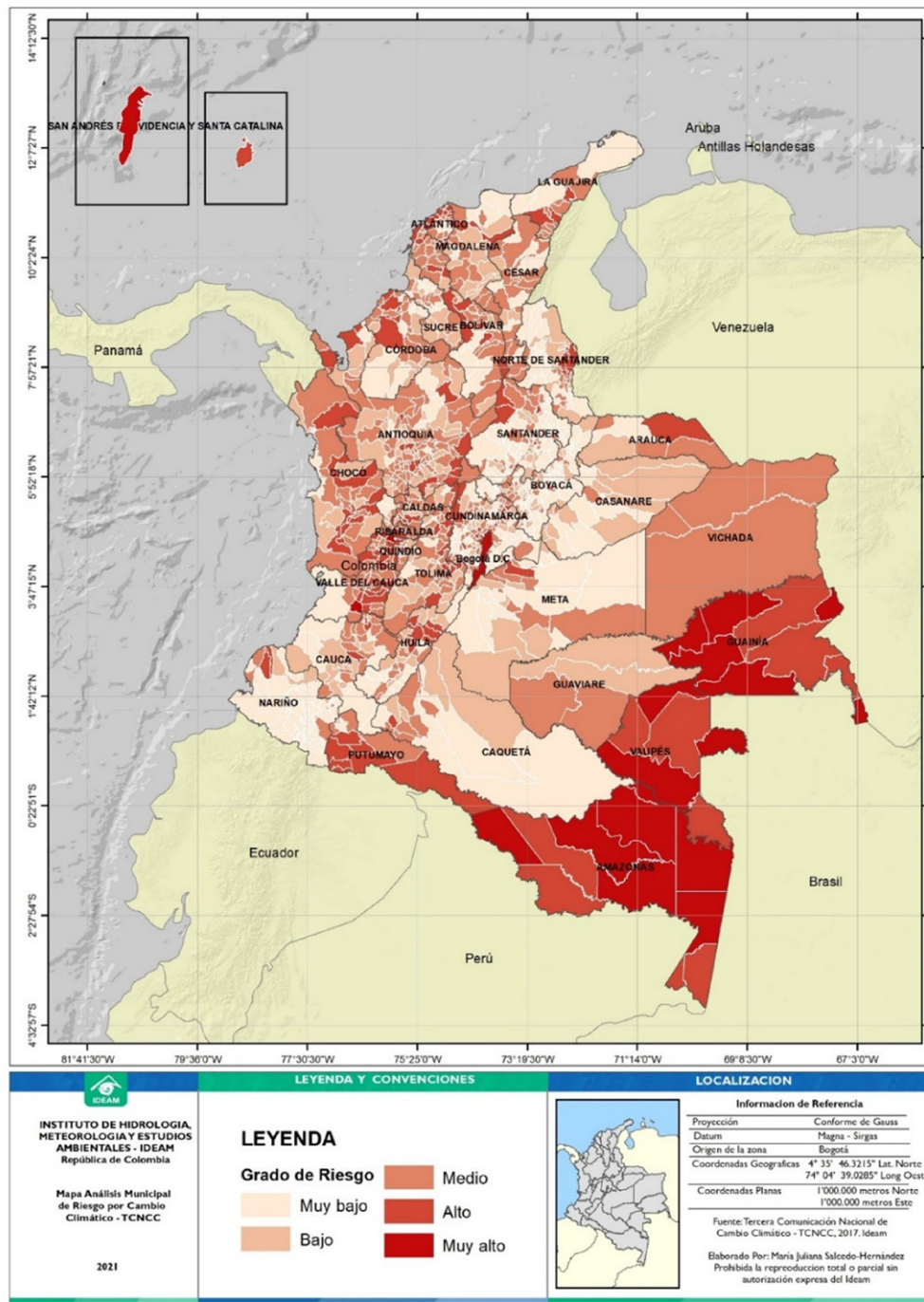
y el IPHE. Asimismo, incorpora información sobre la producción potencial de sedimentos (PPS/RS), el uso de mercurio en la extracción de oro y plata, y el uso de agroquímicos, factores que agravan la criticidad de las unidades de monitoreo. Como resultado, las 316 subzonas hidrográficas del país han sido categorizadas según su grado de criticidad (ver Figura 51).

Riesgo por cambio climático, según escenarios planteados por las CNCC

Las comunicaciones nacionales son el principal mecanismo de reporte establecido para que los 196 países miembros de la CMNUCC presenten sus avances en la implementación de esta convención. Además, permiten recopilar y sistematizar la información, más actualizada, sobre cambio climático, en cada país. De esta manera, se facilita la planificación sectorial y territorial, así como la elaboración de las políticas públicas. Con ello se busca que la toma de decisiones esté correctamente informada, se promuevan los territorios resilientes al cambio climático y la economía sea más eficiente en carbono.

En el marco del BUR del país, ante la CMNUCC, se generan escenarios de cambio climático y análisis de vulnerabilidad y riesgo a nivel departamental y regional. Estos estudios constituyen una base de información para priorizar las unidades de análisis e identificar sitios estratégicos (piloto) para la implementación del protocolo (Figura 52). Lo anterior se sustenta en la relación entre el cambio climático y las proyecciones de variabilidad en la temperatura atmosférica y la precipitación, las cuales están influenciadas por fenómenos como el ciclo El Niño - Oscilación del Sur (ENOS). A su vez, estas variaciones afectan las dinámicas de los ecosistemas acuáticos, según el contexto territorial en el que se desarrollan.

Figura 52. Mapa de Análisis Municipal de Riesgo por Cambio Climático - TCNCC



Fuente: Ideam (2017).

Criterio atención componente étnico y campesinado

Colombia es un país megadiverso no solo en términos biológicos, sino también en su riqueza cultural y étnica, aspectos fundamentales para su desarrollo social y económico. A lo largo y ancho del territorio nacional coexisten más de 92 etnias indígenas (Ministerio del Interior [MinInterior], s.f); además del pueblo Rrom, las comunidades Negras, Afrodescendientes, Raizales y Palenqueras (NARP), así como poblaciones campesinas, cada una con visiones y formas particulares de interacción con el entorno que habitan.

La relación entre el ser humano y la naturaleza, junto con la importancia de las conexiones construidas con el entorno, se reflejan en las expresiones culturales de cada comunidad. El ambiente y el contexto territorial en el que se desenvuelven influyen en aspectos sociales esenciales, como los modos de subsistencia, el desarrollo económico, las creencias, los rituales y la alimentación, entre otros. En este sentido, la diversidad de ecosiste-

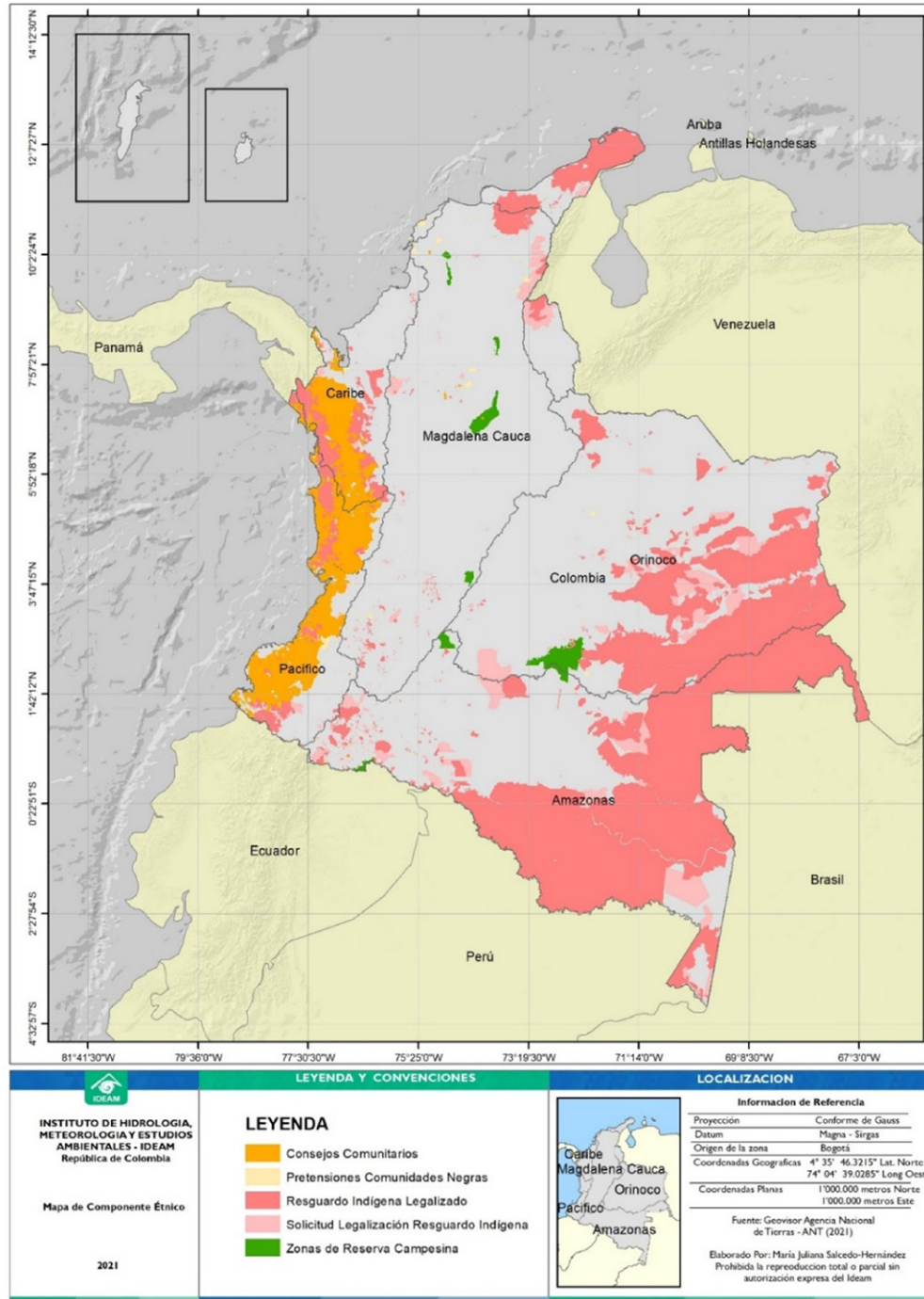
mas que conforman el país es un pilar fundamental de su diversidad cultural. A esto se suman los procesos históricos que han moldeado el mosaico de etnias y culturas que interactúan en el territorio colombiano. Por ello, cualquier iniciativa orientada a la toma de decisiones debe considerar la participación activa de los actores sociales que forman parte de estas comunidades.

Bajo esta perspectiva y con el propósito de adoptar un enfoque integral en el monitoreo, se incorpora en los criterios de priorización de unidades de análisis del protocolo la presencia o pretensiones territoriales de grupos étnicos (pueblos indígenas y NARP), así como de las comunidades campesinas que habitan en las Zonas de Reserva Campesina (ZRC). Para ello, se empleará la información más actualizada disponible, proporcionada y actualizada periódicamente por la ANT (Figura 53).



Leticia - Amazonas

Figura 53. Mapa de Componente Étnico



Fuente: ANT (2021).

Modelo de integración de criterios para priorización de unidades de análisis

A partir de las variables definidas para la selección de unidades de análisis —incluyendo la extensión, según el MEC; la presencia de humedales Ramsar; la priorización de cuencas y unidades ambientales costeras; la criticidad, según el ENA; el análisis de riesgo frente al cambio climático y el componente étnico— se propone un ejercicio de clasificación basado en la asignación de pesos o valores relativos a cada una de estas variables. Para ello, se emplea el método de PAJ, detallado en el capítulo 11 del Promsea.

Este método permite obtener ponderaciones mediante un proceso matemático, facilitando la jerarquización de los criterios en función de su importancia relativa dentro del proceso de selección. En este contexto, el objetivo es identificar las unidades de análisis prioritarias, donde se considera como criterios las variables previamente establecidas. Posteriormente, se elabora una matriz en la que cada fila y columna representa una de las variables a ponderar, y así se estructura el análisis de priorización (ver Figura 54).

Figura 54. Modelo para la construcción de la matriz de comparación de criterios, según la escala de valoración del PAJ

		C1	C2	C3	C4	C5	C6
Cuencas priorizadas CARs	C1						
Criticidad según AIA-ENA	C2						
Análisis de riesgo CC	C3						
Humedal RAMSAR	C4						
Extensión según MEC	C5						
Tema Étnico	C6						

Posteriormente, se lleva a cabo una comparación pareada de los criterios utilizando la escala de comparación pareada. En este proceso, cuando dos elementos tienen la misma importancia, se les asigna un valor de 1 (correspondiente a la comparación de un criterio consigo mismo, lo cual se observa en la diagonal principal de la matriz). Si un criterio es moderadamente preferido sobre otro, se le asigna un valor de 3; si es fuertemente preferido, un valor de 5; y si es extremadamente preferido, un valor de 9. Los valores intermedios (2, 4, 6 y 8) se

utilizan cuando no es posible definir con claridad la preferencia entre los factores, funcionando como valores de ajuste, en la escala de comparación.

A partir de este ejercicio, y mediante el uso de herramientas de software GIS para el análisis espacial, se generó un mapa nacional con categorías de priorización de unidades de análisis, considerando subzonas hidrográficas y unidades ambientales costeras.

Análisis de presiones indirectas: clasificación socioeconómica de las unidades de análisis

La complejidad y heterogeneidad de las áreas hidrográficas, zonas, subzonas y unidades ambientales costeras dificultan el desarrollo de enfoques científicos integrados y generalizables para su evaluación y gestión a nivel nacional y regional. En este contexto, uno de los métodos más utilizados para categorizar sistemas heterogéneos es la clasificación sistemática (McDonnell y Woods, 2004; Wagener *et al.*, 2008). Aunque cada subzona hidrográfica y unidad ambiental costera presenta características particulares, agruparlas en categorías con base en atributos similares, puede proporcionar indicadores útiles sobre sus condiciones socioeconómicas y los impactos en los sistemas hídricos. Esta estrategia permite el desarrollo de modelos hidrológicos, el diseño de redes de observación y el análisis socioeconómico en diferentes escalas (nacional, regional y local) (Mayer *et al.*, 2014).

De acuerdo con esto, la clasificación de las unidades de análisis permite:

- Seleccionar subzonas hidrográficas o unidades ambientales costeras "modelo" para estudios detallados, que sirvan como referencia para la ampliación regional de los resultados obtenidos.

- Caracterizar el comportamiento de estas unidades en relación con actividades económicas, como el desarrollo del sector de hidrocarburos, permitiendo extrapolar información en sitios con pocos datos a partir de registros extensos en unidades similares (Ilorme y Griffis, 2013).

- Evaluar contextos de gestión. Por ejemplo, esta clasificación puede facilitar la adopción y adaptación de políticas de gestión en subzonas hidrográficas o unidades ambientales costeras con condiciones sociales y ambientales similares (Wardrop *et al.*, 2007).

Dado que los indicadores ecológicos buscan equilibrar las dimensiones sociales, económicas y ambientales en la toma de decisiones (Turnhout *et al.*, 2007), es recomendable incluir no solo atributos biofísicos, sino también características socioeconómicas dentro de los criterios de clasificación de subzonas hidrográficas y unidades ambientales costeras. Los aspectos socioeconómicos asociados a los recursos hídricos varían, significativamente, entre unidades de análisis y son esenciales para comprender los contextos políticos y de gestión (Mayer *et al.*, 2014).

Insumos existentes para la clasificación

Se establecen como insumos primarios para el análisis, los siguientes mapas oficiales: el mapa de zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia, a escala 1 : 500.000 (Ideam, 2013a), empleando la Subzona Hidrográfica (SZH) como unidad mínima de clasificación para el enfoque epicontinental; los mapas de delimitación de unidades ambientales

costeras disponibles en la plataforma del Invemar, utilizando la UAC como unidad mínima de clasificación para el enfoque marino-costero; y el mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia, a escala 1 : 100.000, que permite el análisis en relación con los ecosistemas síntesis priorizados en el Promsea y su distribución dentro de cada SZH y UAC.

Para la clasificación socioeconómica de las SZH y UAC se emplean herramientas de análisis y modelamiento espacial. De esta manera, se asocian los datos geográficos existentes que reflejan las acti-

vidades socioeconómicas en el área de estudio. A continuación, se presentan los insumos considerados para el análisis a nivel nacional:

Enfoque epicontinental (insumos para la clasificación de SZH)

Deforestación:

Mapa anual de cambio de la superficie de bosque natural generada por el SMByC⁴. Siguiendo los lineamientos y directrices internacionales respecto al monitoreo forestal y apoyándose en el uso de las tecnologías satelitales. Las actividades de monitoreo de bosques tienen por objeto generar y difun-

dir la cartografía temática y los reportes estadísticos pertinentes sobre la extensión, distribución y los cambios en la cobertura boscosa, conforme a la escala 1 : 100.000 (Galindo *et al.*, 2014). La información generada permite identificar el área deforestada, anualmente, en todo el territorio nacional.

Actividades de los sectores eléctrico, infraestructura, minero e hidrocarburos

Capa de áreas de proyectos en evaluación y seguimiento generadas por la Anla; entidad encargada de que los proyectos, obras o actividades sujetos de licenciamiento, permiso o trámite ambiental cumplan con la normativa ambiental, de tal manera que contribuyan al desarrollo sostenible del país (artículo 2, Decreto 3573 de 2011). La información generada permite identificar el área ocupada por proyectos de licenciamiento ambiental, en todo el territorio nacional⁵.

da por la Agencia Nacional de Minería (ANM), entidad de carácter técnico cuyo objeto es administrar integralmente los recursos minerales de propiedad del Estado, promover el aprovechamiento óptimo y sostenible de los recursos mineros de conformidad con las normas pertinentes y en coordinación con las autoridades ambientales en los temas que lo requieran, así como hacer seguimiento a los títulos de propiedad privada del subsuelo (artículo 3, Decreto 4134 de 2011). La información generada permite identificar el área ocupada por proyectos con títulos y solicitudes mineras vigentes en todo el territorio nacional⁶.

Como complemento a la información del sector minero, se utiliza la capa de títulos mineros genera-

Actividades del sector agrícola

Base de datos generadas a partir de las Evaluaciones Agropecuarias Municipales (EVA) realizadas por la UPRA del MADR. Estas evaluaciones son

el resultado de la consolidación de información y conocimiento de la oferta agropecuaria del país, a nivel municipal, fundamental para la toma de

4 Para identificar el área deforestada, anualmente, en todo el territorio nacional, consultar en formato ráster: <http://smbyc.ideam.gov.co/MonitoreoBC-WEB/reg/indexLogOn.jsp>.

5 Para identificar el área, en formato vectorial, consultar el geovisor del SIAC: <http://sig.anla.gov.co:8083/>

6 Capa en formato ráster disponible y actualizada, constantemente, en: <https://annamineria.anm.gov.co/Html5Viewer/index.html?viewer=SIGMExt&locale=es-CO&appAcronym=sigm>.



decisiones. Constituyen el sistema básico para la construcción de estadísticas sectoriales y municipales en relación con variables de área, producción y rendimiento, y se construyen con la participación de autoridades del sector en cada municipio. La información se encuentra enmarcada en el Sistema Nacional Unificado de Información Rural Agropecuaria (SNUIRA), estrategia que pretende

armonizar todas las cifras del sector, mediante la validación de otras fuentes de información gremial y departamental (como la Encuesta Nacional Agropecuaria realizada por el Dane) (UPRA, 2021). La información generada permite identificar el área destinada para la siembra en todos los municipios del territorio nacional⁷.

Actividades del sector pecuario

Base de datos generadas a partir del Censo Pecuario Nacional realizado por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) del MADR. Los datos censales se consolidan, anualmente, para cada especie por municipio y departamento, y son el resultado de la recopilación de la información proporcionada del registro de vacunaciones según la especie (como el caso de bovinos, búfalos, porcinos y equinos), así como de información recopilada de los productores nacionales representados por los respectivos gremios de cada especie. Adicionalmente, esta información se complementa y ajusta

con el inventario que se obtiene producto de las visitas de vigilancia activa y pasiva que hace periódicamente el ICA, y con los registros en cada una de las unidades municipales de asistencia técnica agropecuaria, secretarías de Desarrollo Agropecuario y Desarrollo Rural de los municipios (ICA, 2021). La información generada permite calcular la densidad de la población de animales, a partir de la relación entre el número de individuos censados por especie en el municipio y su área⁸.

7 Para identificar el área destinada para la siembra, consultar: <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=59>

8 Para ampliar información sobre densidad poblacional de animales, consultar: <https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018>



Densidad poblacional

Base de datos generada a partir de las proyecciones de población municipal, para el periodo de 2018 a 2035, realizadas con base en la información del Censo Nacional de Población y Vivienda (CNPV) de 2018, realizado por el Dane.

El CNPV es la operación estadística más compleja e importante que hace el país, en la cual se recoge información veraz y completa de las personas, hogares y viviendas en el territorio colombiano, con el fin de establecer cuántos somos, dónde estamos y cuáles son las principales características sociode-

mográficas de la población residente habitual en Colombia. Se constituye en el insumo fundamental para el diseño de la política pública en todos los ámbitos del país (Departamento Administrativo Nacional de Estadística [Dane], 2021).

La información generada permite calcular la densidad poblacional a partir de la relación entre el total de personas en zonas urbana y rural, por municipio y su área, para los diferentes años proyectados⁹.

Áreas protegidas o destinadas a la conservación y/o manejo ambiental

Las capas de áreas del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (Sinap) son generadas por las diversas entidades que lo componen (PNN, las corporaciones autónomas regionales, las organizaciones

de la sociedad civil, entre otros). El Sinap es el conjunto de áreas protegidas, actores sociales y estrategias e instrumentos de gestión que las articulan, para contribuir, como un todo, al cumpli-

⁹ Información en formato Excel disponible en: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>

miento de los objetivos de conservación del país. Incluye todas las áreas protegidas de gobernanza pública, privada o comunitaria, y del ámbito de gestión nacional, regional o local (PNN, 2021), entre las cuales se encuentran parques nacionales naturales, reservas forestales protectoras nacio-

nales y regionales, distritos regionales y nacionales de manejo integrado y reservas naturales de la sociedad civil. La información generada permite identificar el área destinada a la protección, conservación y/o manejo ambiental en todo el territorio nacional¹⁰.

El enfoque marino costero (insumos para la clasificación de UAC)

Para el caso de las UAC, a continuación, se enlistan algunos insumos que podrían ser utilizados para la clasificación, a partir de la asociación de datos geográficos de actividades socioeconómicas características de la zona marino costera del país.

Proyectos de hidrocarburos *off-shore*:

Capa de áreas de proyectos en evaluación y seguimiento generadas por la Anla. La información generada permite identificar el área ocupada por proyectos de hidrocarburos *off-shore* en todo el territorio nacional.

Áreas marino – costeras protegidas o destinadas a la conservación y/o manejo ambiental

Capa de áreas del Samp generadas por las diversas entidades que componen el Sinap y desarrollan sus actividades con enfoque marino - costero (PNN, Invemar, organizaciones de la sociedad civil, entre otros). La información generada permite identificar el área marino - costera destinada a la protección, conservación y/o manejo ambiental en todo el territorio nacional y se encuentra disponible y actua-

lizada constantemente en el Sistema de Soporte a las Decisiones para el Subsistema de Áreas Marinas Protegidas (SSD SAMP)¹¹, geovisor del Invemar.

Tráfico marítimo

Base de datos generada a partir de las operaciones estadísticas de la Dimar, autoridad marítima colombiana, encargada de ejecutar la política del gobierno en esta materia. Vela por la seguridad integral marítima, la protección de la vida humana en el mar, la promoción de las actividades marítimas y el desarrollo científico y tecnológico de la nación (Dimar, 2021). La información generada permite conocer las series históricas de la distribución de operaciones nacionales de naves de carga por tamaño y puerto y la distribución de operaciones internacionales de buques por tipo de carga y puerto en todo el territorio nacional¹².

Es importante mencionar que, para complementar el análisis desde el enfoque marino costero, se recomienda considerar la clasificación obtenida para las SZH aledañas a las UAC objeto de estudio.

10 Información disponible y actualizada constantemente en formato vectorial en: <http://sig.anla.gov.co:8083/>

11 Información disponible en formato vectorial: <http://cinto.invemar.org.co/ssdsampindicadores/>

12 Información disponible en formato Excel en: [https://www.dimar.mil.co/operaciones-estadisticas/estadisticas-de-transporte-maritimo-nacional/series-historicas-estadisticas-de-transporte-maritimo-nacional/series-historicas-estadisticas-de-transporte-maritimo-nacional/series-historicas-estadisticas-de-transporte-maritimo-nacional/series-historicas-estadisticas-de-transporte-maritimo-nacional](https://www.dimar.mil.co/operaciones-estadisticas/estadisticas-de-transporte-maritimo-nacional/series-historicas-estadisticas-de-transporte-maritimo-nacional-o-de-cabotaje) y [https://www.dimar.mil.co/operaciones-estadisticas/estadisticas-de-transporte-maritimo-internacional/series-historicas-estadisticas-de-transporte-maritimo-internacional/series-historicas-estadisticas-de-transporte-maritimo-internacional](https://www.dimar.mil.co/operaciones-estadisticas/estadisticas-de-transporte-maritimo-internacional/series-historicas-estadisticas-de-transporte-maritimo-internacional)

Metodología de análisis para la clasificación socioeconómica de las subzonas hidrográficas y unidades ambientales costeras del país

La clasificación de las SZH y UAC se fundamenta en la identificación y análisis del área ocupada, la densidad de individuos y el número de operaciones (para el caso del tráfico marítimo), atributos relacionados con las diferentes actividades socioeconómicas de la unidad mínima de clasificación.

De acuerdo con las características de los insumos de datos geográficos referidos, los pasos para lograr este objetivo, a través de herramientas de análisis y modelamiento espacial, se resumen a continuación:

Alistamiento de la información (bases de datos, archivos vector y ráster)

Se debe tener presente que los insumos se encuentran en formatos distintos, vector, ráster y bases de datos, por lo que el alistamiento de la información se realiza teniendo en consideración su naturaleza.

- **Capas en archivo ráster:** SMBYC, ANM.
- **Capas en archivo vector:** Anla, Sinap.
- **Bases de datos:** UPRA, Censo Pecuario Nacional del ICA, CNPV del Dane, operaciones estadísticas de la Dimar.

Identificación y revisión de los atributos de interés

Se procede a identificar y revisar los atributos para el análisis, los cuales se encuentran relacionados con i) el **área ocupada** o destinada para el desarrollo de actividades de los sectores eléctrico, infraestructura, minero, hidrocarburos y agrícola, así como el área deforestada y aquella que hace parte del Sinap; ii) el número total de animales del sector pecuario y la población humana para el posterior cálculo de la densidad por municipio; iii) el número de operaciones marítimas (arribos a puertos).



Caño Correa. Canal del Dique Maria la Baja - Bolivar

Superposición de capas mediante intersección

Dado que las unidades de análisis de los insumos geográficos utilizados no coinciden con las SZH o UAC, es necesario extrapolar la información de los atributos de interés. Para este proceso, se emplean las capas de SZH o UAC como unidades mínimas de análisis, mientras que las capas representativas de las actividades socioeconómicas se utilizan como insumos base para la clasificación. El análisis geoespacial se lleva a cabo mediante la herramienta de intersección del software GIS, a partir de los atributos de interés.

En los casos en los que los atributos analizados no cuentan con información espacialmente explícita,

se asume una distribución uniforme dentro de la unidad de análisis correspondiente. En estos casos, el valor a extrapolar se establece en función del porcentaje de área que se interseca con la SZH o UAC. Como resultado, se generan múltiples capas vectoriales que contienen información sobre la ocupación, densidad o número de operaciones de las actividades socioeconómicas dentro de las SZH o UAC. Finalmente, para consolidar en un solo archivo los atributos analizados en relación con cada actividad socioeconómica presente en estas unidades, se aplica la herramienta de unión del software GIS.

Análisis de datos y clasificación de SZH y UAC

Para clasificar las SZH y las UAC del país, se requiere la combinación de dos métodos estadísticos multivariados. En primer lugar, se aplica un Análisis de Componentes Principales (ACP) utilizando la información socioeconómica asociada, obtenida mediante herramientas de análisis y modelamiento espacial. Esta técnica permite reducir la dimensionalidad de los datos, buscando combinaciones lineales (componentes principales) de las variables originales que retengan la mayor parte de la variabilidad total. Las combinaciones deben ser no correlacionadas entre sí y maximizar la variabilidad explicada respecto a las componentes siguientes.

A partir de las dos primeras componentes principales, se genera un plano factorial, un sistema cartesiano en el que se proyectan los individuos y las variables originales del fenómeno analizado. Este gráfico permite identificar patrones naturales de

agrupación dentro de los datos. Posteriormente, se aplica un segundo método multivariado: el análisis de conglomerados, cuyo objetivo es identificar un número reducido de grupos en los que los individuos dentro de cada conjunto sean similares entre sí en función de sus variables originales, y a su vez, presenten diferencias significativas con los grupos restantes.

Para garantizar la correcta agrupación de los datos, se utiliza una medida de distancia que refleje la similitud entre los objetos analizados. Una vez definidos los conglomerados, se realiza una interpretación cualitativa y cuantitativa de los resultados con el apoyo de expertos en el área. El análisis final de los resultados permitirá la clasificación de las SZH y UAC en distintas categorías y subcategorías, según las principales actividades socioeconómicas presentes en cada una (Ver Tabla 55).

Tabla 55. Categorías de clasificación de las SZH y UAC, de acuerdo con la presencia y tendencias de las actividades socioeconómicas

Categoría	Subcategoría
Industrializada	Minera, hidrocarburos, energía, mixtas
Agrícola	Cereales, cultivos tropicales tradicionales, frutales, fibras, otros transitorios, tubérculos y plátanos
Pecuaría	Bovinos, porcinos, aves, bufalino, equinos – ovinos – caprinos, mixtas
Urbana	---
Rural	---
Conservación	---

Selección de variables complementarias para el monitoreo, de acuerdo con la clasificación socioeconómica de las SZH y UAC

De acuerdo con la clasificación obtenida para cada SZH o UAC, se han de definir las variables, índices o indicadores complementarios a incluir en el monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos en el área de estudio. Estos elementos han de estar alineados con los posibles impactos derivados de las principales actividades socioeconómicas identificadas en cada unidad de análisis.

Por ejemplo, en SZH con alta actividad industrial o minera, se ha de priorizar el monitoreo de metales pesados y otros contaminantes asociados a la actividad extractiva. De igual manera, en áreas con alta presión agrícola, se ha de evaluar la presencia de residuos de agroquímicos y su impacto en la calidad del agua. En el caso de zonas turísticas o urbanizadas, lo relevante han de ser los indicadores de contaminación orgánica, carga de nutrientes y calidad microbiológica del recurso hídrico.

Análisis de tendencia

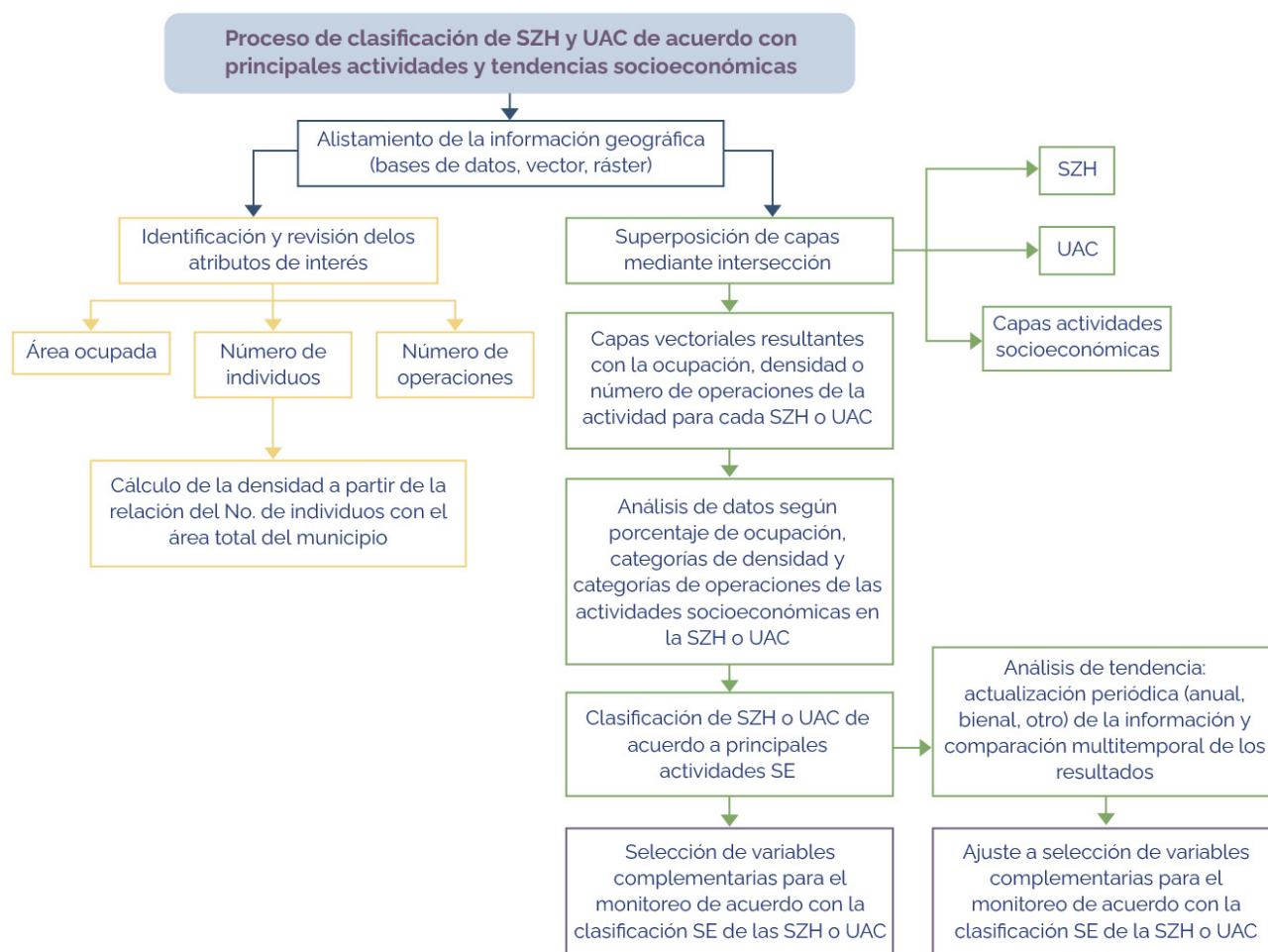
Un análisis de tendencia es viable en la medida en que se establezca y garantice una periodicidad estandarizada para la recolección y análisis de datos en el tiempo. Para que este análisis sea representativo y robusto, lo que se recomienda

es que exista una serie de datos multitemporales con, al menos, 50 registros equiespaciados. De esta manera, se pueden identificar patrones de cambio, a lo largo del tiempo, en los ecosistemas acuáticos en estudio.

Con base en los resultados obtenidos, es posible realizar ajustes en la selección de variables complementarias para el monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos. Además, se asegura

que los indicadores evaluados respondan, de manera precisa, a las dinámicas y presiones socioeconómicas identificadas en cada SZH o UAC (ver Figura 55).

Figura 55. Diagrama resumen de la metodología de análisis para la clasificación socioeconómica de las SZH y UAC



Limitaciones de la hoja de ruta metodológica

La metodología planteada constituye un primer acercamiento a la posibilidad de clasificar las SZH y UAC del país con base en la información geográfica oficial existente y disponible, en relación con el de-

sarrollo de diferentes actividades socioeconómicas en el territorio nacional. Por lo tanto, es importante considerar las siguientes tres limitaciones:

- Es una hoja de ruta metodológica general, por lo que en la implementación se espera que surjan algunos ajustes necesarios para lograr mejores resultados (validación).
- La base información es generada a escala nacional, por ello se invita a identificar información con mayor detalle (local y regional) y calidad, para poder generar análisis con menor incertidumbre.

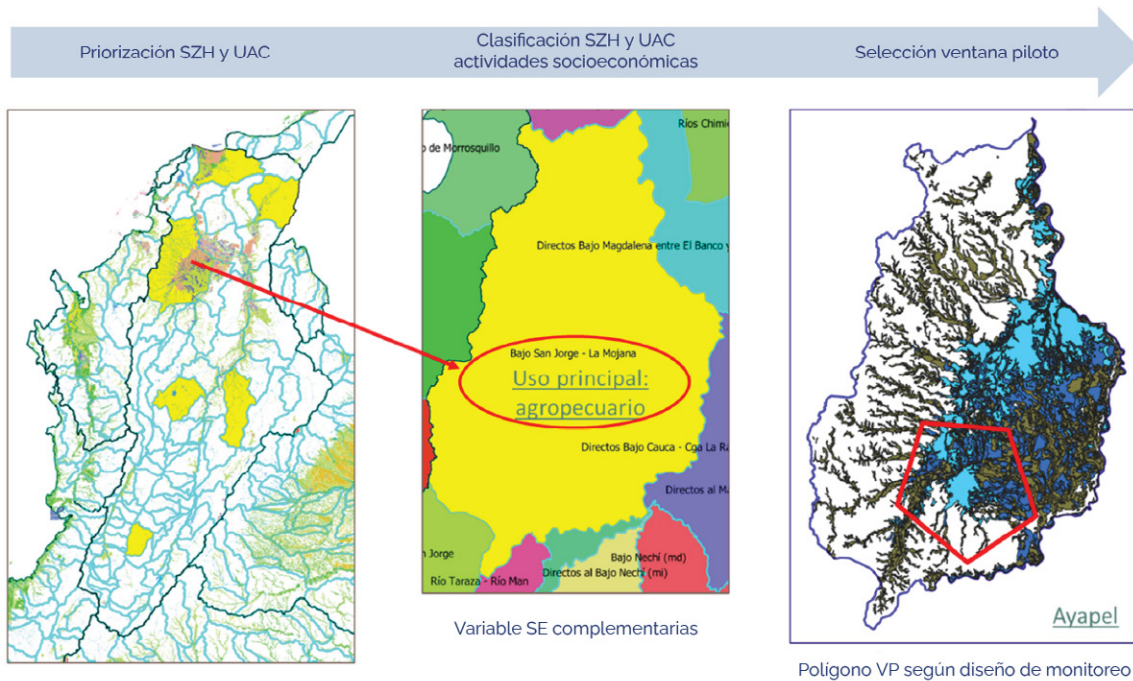
- Para realizar un análisis de tendencia se debe tener suficiente información, en el tiempo, y con los datos recolectados ajustar modelos de series pertinentes que proporcionen el mejor valor futuro de la variable de interés con pronósticos estadísticos e intervalos de confianza adecuados. De no tener suficiente información en el tiempo (al menos 50 datos equiespaciados), los pronósticos realizados carecen de validez.

Revisión y análisis de la información para la selección de ventanas piloto en las unidades de análisis prioritizadas

Posterior a la priorización y clasificación socioeconómica de las unidades de análisis (SZH y UAC), será necesario definir una posible ventana piloto de implementación y validación del Promsea en estas áreas. La cual, corresponderá al polígono

que delimite la zona en la que se realiza o realizará el monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos, según el diseño de monitoreo existente o a generar, según sea el caso (ver Figura 56).

Figura 56. Ejemplo de los posibles resultados del desarrollo de los pasos 1, 2 y 3 de la hoja de ruta para la implementación y validación del Promsea, en ventanas piloto



La revisión y análisis de la disponibilidad y calidad de la información sobre procesos de monitoreo existentes, así como la identificación de las posibilidades para el levantamiento de la información necesaria para la implementación del Promsea, en las unidades de análisis priorizadas, constituyen el

paso fundamental para la definición de las ventanas piloto de monitoreo y seguimiento de ecosistemas acuáticos.

A continuación, se describen los pasos mínimos relacionados con este proceso.

Pasos mínimos para la selección de ventanas piloto para el monitoreo, en las unidades de análisis priorizadas

Para la selección de las posibles ventanas piloto de implementación, cada entidad llevará a cabo un análisis detallado de la información recopilada y registrada, a través del monitoreo de los ecosistemas acuáticos, en las áreas priorizadas (SZH y UAC). El objetivo de este análisis es determinar si estos ecosistemas cuentan con la información mínima requerida para su evaluación, si disponen o tienen proyectados recursos para su monitoreo y si están priorizados en los planes de acción anual de las instituciones responsables.

Para este ejercicio se ha diseñado una matriz que responde a una serie de consultas específicas que se señalan a continuación:

- Escala de monitoreo (macrocuenca, cuenca, paisaje, zona, local ...).
- Tipo de ecosistema monitoreado (Clasificación, según los ecosistemas síntesis del MEC 2017).
- Nombre del ecosistema monitoreado.
- ¿El ecosistema pertenece a una declaratoria de protección nacional o internacional?
- Polígono de monitoreo (coordenadas en grados decimales).
- Fecha inicio del monitoreo.
- Vigencia del monitoreo.
- ¿Obedece a un programa de monitoreo interno?
- ¿Está anclado a un plan anual de monitoreo?
- Frecuencia del monitoreo (mensual, trimestral, semestral, anual, bianual, entre otras).
- Número monitoreos realizados al año.
- Número puntos de monitoreo.
- Guías, protocolos, manuales adoptados para el monitoreo (Internos y de otras entidades).
- Comunidades hidrobiológicas monitoreadas (Tener presentes las matrices agua, sedimento y suelo).
- Variables físicas y químicas monitoreadas (Tener presentes las matrices agua, sedimento y suelo).
- Variables socioeconómicas/ecológicas monitoreadas (Tener presentes las matrices agua, sedimento y suelo).

- Índice y/o indicador de monitoreo y seguimiento asociado a los componentes monitoreados (Especificar índices/indicadores que la entidad calcula con estos datos).
- Accesibilidad a equipos de monitoreo en campo y análisis de laboratorio (Especificar si la entidad cuenta con insumos/equipos/instalaciones propias o si contrata con externos).
- Sistemas de disposición de la información (Especificar el sistema o formato de reporte de la información).
- Instituciones articuladas en el monitoreo (SINA, autoridades ambientales regionales, ONG, fundaciones y academia, entre otros).

- Alianzas o convenios vigentes de cooperación que permitan el monitoreo y vigencia de estas.
- Accesibilidad en términos de seguridad (orden público), condiciones geográficas y medios de transporte.

Una vez finalizado el análisis de la información recopilada, el siguiente paso es la comparación de variables (las ya reportadas, con las variables priorizadas). Las del Promsea han sido seleccionadas con base en un enfoque metodológico que permite analizar diferentes presiones identificadas, en cada área hidrográfica del país. Las variables se organizan y priorizan en función de tres fenómenos de transformación clave, los cuales constituyen el eje central de la primera versión del Promsea.

Pasos mínimos para la implementación del Promsea, en la ventana piloto seleccionada

Una vez identificadas las ventanas de monitoreo, se inicia la etapa de concreción, donde se evalúan los insumos disponibles para la evaluación de los fenómenos priorizados. Esta selección se basa en las presiones con mayor impacto en la zona de estudio. Además, en esta fase se gestionan los acuerdos interinstitucionales para garantizar la viabilidad técnica y financiera del proceso.

A continuación, se presentan los pasos generales para la implementación del Promsea, en la ventana piloto seleccionada:

1. Revisión conceptual y metodológica del Promsea.
2. Definición del fenómeno de transformación a monitorear en la ventana piloto, según el ecosistema acuático priorizado y la clasificación socioeconómica.

3. Revisión de las variables e índices para la evaluación del fenómeno de transformación a monitorear.

4. Revisión de las guías, protocolos o lineamientos bajo los cuales se realiza o se debe realizar el monitoreo actual en la ventana piloto (generación de un manual de campo para las mediciones y monitoreo de las variables, ajustado a condiciones de ecosistemas acuáticos).

5. Identificación del sistema de información o de las bases de datos en los que se dispone o se debería disponer la información alfanumérica y geográfica de las variables e índices objetivo.

6. Solicitud de acceso a la entidad responsable y/o gestión de los acuerdos institucionales para la revisión y análisis de la información.



7. Levantamiento e inventario de los insumos necesarios para el análisis espacial de las variables, índices e indicadores relacionados con el fenómeno de transformación que se desea monitorear.

8. Revisión y análisis estadístico de la información, según los lineamientos planteados en el Promsea (ver Capítulo 5).

9. Definición de las variables e índices óptimos para el monitoreo y seguimiento (tener en cuenta las variables complementarias, según la clasificación socioeconómica de SZH y UAC).

10. Ajuste de los modelos de los fenómenos de transformación priorizados, según las necesidades de monitoreo.

11. Generación del Plan de Monitoreo (diseño muestral) para el levantamiento de información, en las ventanas piloto, teniendo en cuenta las consideraciones para la construcción del Marco Geoestadístico.

12. Validación y análisis de los resultados obtenidos con las actividades de monitoreo, para la ventana piloto.

13. Reporte del estado de los ecosistemas acuáticos monitoreados.

Consideraciones para el análisis estadístico de la información, la construcción del marco geoestadístico y la generación del índice, en el marco del proceso de implementación y validación del Promsea

Análisis estadístico de la información

La selección, revisión, desarrollo y elaboración de la información estadística, incluyendo indicadores e índices, han de alinearse con los lineamientos establecidos por el Sistema Estadístico Nacional (SEN). Esto, con el fin de minimizar los errores en

las mediciones y, por consiguiente, los datos erróneos o faltantes que puedan afectar el análisis en estudios de campo o investigaciones, efectuados por los usuarios finales de la información.

Análisis de datos según la naturaleza de las variables

Los datos constituyen el insumo principal para el modelo de seguimiento y evaluación de los ecosistemas acuáticos del país. Por ello, es vital garantizar su correcto análisis y procesamiento. El primer paso, en este proceso, es la identificación de la naturaleza de los datos, lo que implica determinar si corresponden a variables cualitativas o cuantitativas, ya que el tratamiento y análisis varía.

Una vez identificada la naturaleza de los datos, se procede a realizar un análisis descriptivo y/o exploratorio. Este permite comprender el comportamiento de las variables, depurar la base de datos y preparar la información para su integración en el modelo de monitoreo. A continuación, se presentan las principales medidas y técnicas de análisis que pueden aplicarse según el tipo de variable.

• Variables cualitativas

El tipo de dato de una variable es cualitativo si sus posibles valores corresponden a características o cualidades / atributos. Dentro de estas variables se distinguen dos posibilidades:

- Cualitativas nominales, sin orden inherente. No pueden ordenarse de manera jerárquica (por ejemplo, tipos de ecosistemas o nombres de especies).
- Cualitativas ordinales, cuando se posibilita un orden de los datos (por ejemplo, niveles de riesgo ambiental: bajo, medio, alto).

Para este tipo de datos, es común elaborar tablas de frecuencia, que incluyen:

- Frecuencia absoluta, que indica la cantidad de veces que aparece cada categoría en el conjunto de datos.
- Frecuencia relativa, que representa la proporción de cada categoría respecto al total de observaciones, obtenida al dividir la frecuencia absoluta entre el total de registros.

Cuando se trabaja con dos o más variables cualitativas, se pueden construir tablas de contingencia, las cuales permiten analizar la relación entre diferentes categorías, facilitando la interpretación de los datos. Además, es necesario validar que las categorías de cada variable sean consistentes con la característica que se pretende medir. Para ello, se recomienda:

- Homogeneizar las categorías mediante un diccionario de datos o tesoro, evitando errores de escritura o duplicaciones debidas a variaciones en la nomenclatura.

- Identificar valores faltantes (*missing values*). Si se detecta una cantidad significativa de datos ausentes, es posible aplicar técnicas de imputación, las cuales serán abordadas en secciones posteriores.

- Variables cuantitativas

Una variable es de tipo cuantitativo si representa cantidades medibles, son numéricas. Dentro de esta clasificación, se distinguen:

- Cuantitativa discreta, cuando los valores posibles son números enteros, como el número de especies registradas en un ecosistema o la cantidad de monitoreos realizados en un año, y aislados.
- Cuantitativa continua, cuando los valores pueden tomar cualquier número dentro de un rango, como la concentración de oxígeno disuelto en el agua o la temperatura de un cuerpo de agua.

Este tipo de variables permite un análisis más detallado. Los datos se pueden presentar en tablas y en gráficos, se pueden calcular diversas medidas estadísticas, entre ellas:

- Medidas de tendencia central, como la media, mediana y moda.
- Medidas de posición, como los percentiles y cuartiles.
- Medidas de dispersión, como la varianza, desviación estándar y rango intercuartílico.
- Análisis de distribución, para determinar patrones en los datos y evaluar su comportamiento.

Para realizar estos análisis, existen diversas herramientas estadísticas. Una de las más utilizadas es el Software R, un entorno de software libre especializado en gráficos y computación estadística (R Core Team, 2023), ampliamente empleado en estudios ambientales y análisis de datos de monitoreo de ecosistemas. Algunos pasos útiles para el análisis de variables cuantitativas:

1. Lectura de la base de datos.
2. Identificación de datos faltantes o ausentes.
3. Generación de tabla de frecuencias.
4. Verificación de la presencia de valores atípicos (*análisis boxplot*).
5. Comprobar estadísticamente la asimetría de los datos mediante parámetros de forma (coeficiente de asimetría de Fisher, coeficiente de asimetría de Yule o Coeficiente de asimetría de Pearson, entre otros).
6. Análisis de la curtosis o aplanamiento de la distribución de los datos mediante parámetro de aplanamiento (coeficiente de Pearson).
7. Cálculo de las medidas de posición y tendencia central, como lo es la media aritmética, mediana y cuartiles; y las medidas de dispersión, como la desviación estándar, el rango y el coeficiente de variación.

Tratamiento de la información con ausencia de respuesta

La mayoría de los estudios muestrales y censales enfrentan desafíos relacionados con la información faltante en encuestas o monitoreos. Es común que algunas mediciones no se registren, generando espacios en blanco, datos incompletos o valores vacíos, lo que puede afectar la calidad del análisis y la interpretación de los resultados. Estos datos faltantes pueden deberse a diversas razones, como la falta de respuesta en encuestas, mediciones parciales o ausencia de datos en ciertas condiciones.

A lo largo del tiempo, se han desarrollado diversas técnicas estadísticas para manejar estos casos. Se han trabajado desde métodos tradicionales hasta enfoques más avanzados para datos multivariados.

- Métodos de imputación

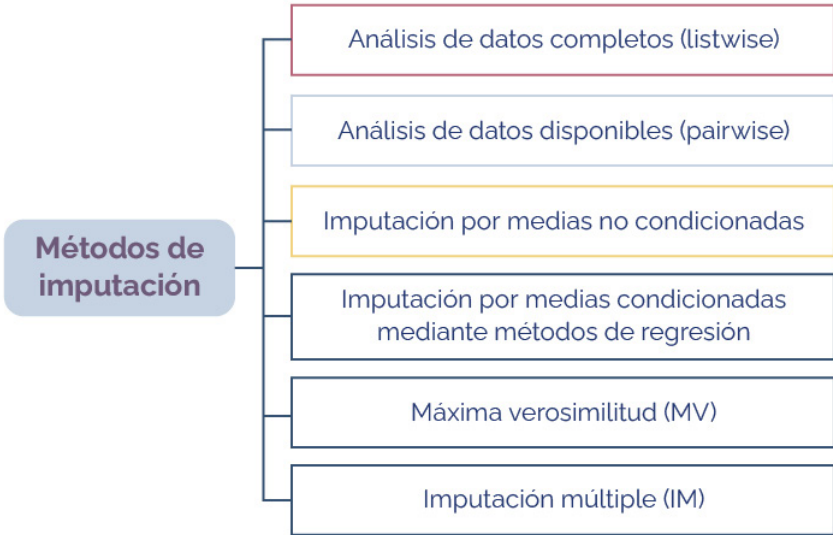
En la literatura estadística existen diferentes técnicas o métodos de imputación que permiten conservar las características de las variables, tanto para estudios univariantes como multivariantes.

Entre estos, una de las estrategias más utilizadas es la imputación de datos faltantes, la cual consiste en estimar los valores ausentes, para completar el conjunto de datos y permitir la aplicación de análisis estadísticos de manera más precisa.

Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) (2021), la imputación es un procedimiento estadístico en el que se asignan valores a elementos de datos específicos cuando las respuestas están ausentes o no disponibles. Este proceso se basa en las características del individuo y en patrones de respuesta de sujetos similares, con el objetivo de reducir el sesgo derivado de la falta de información y mejorar la validez de los análisis realizados.

Según Little y Rubin (2002), los diferentes métodos de imputación se pueden clasificar como se muestra en la Figura 57.

Figura 57. Clasificación de los métodos de imputación

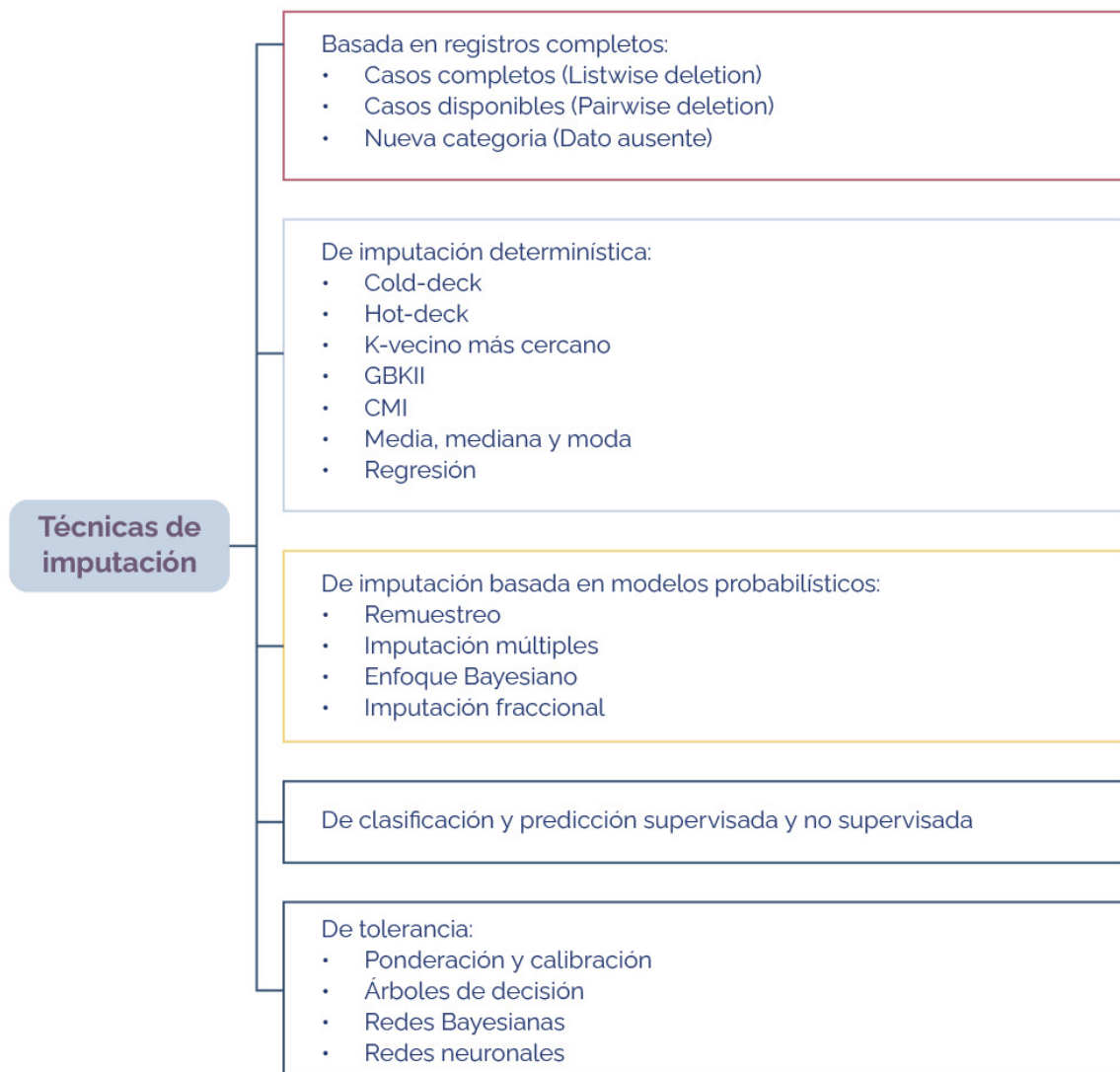


Fuente: Little y Rubin (2002).

Una visión un poco más amplia de las técnicas de imputación la presenta Del Castillo (2012), quien explica que las técnicas se pueden clasificar en cinco grupos: basadas en registros completos, de imputación determinista, de imputación basada en

modelos probabilísticos, de clasificación y predicción supervisada y no supervisada y de tolerancia. La Figura 58 muestra la clasificación propuesta por el autor.

Figura 58. Técnicas de imputación



Fuente: Del Castillo (2012).

A continuación, se resumen las principales técnicas de imputación:

- *Técnicas basadas en registros completos*

Estas técnicas son conocidas como técnicas de ignorancia, ya que omiten la existencia de datos ausentes en el análisis. Las más utilizadas dentro de esta clasificación son la *Listwise deletion* y la *Pairwise deletion*. Sin embargo, un inconveniente frecuente en el uso de estas técnicas es que requieren que los datos faltantes sean completamente aleatorios (MCAR, por su sigla en inglés de *Missing Completely at Random*), lo que significa que la ausencia de información no debe estar relacionada con ninguna otra variable del conjunto de datos.

La técnica de *Listwise deletion* consiste en eliminar, por completo, aquellos registros que contienen al menos una variable con información faltante. Es decir, si un individuo tiene un solo valor ausente en alguna variable, se suprime toda su información

del análisis. En la práctica, esta técnica solo se recomienda cuando la cantidad de datos faltantes es mínima, ya que su aplicación puede reducir significativamente el tamaño de la muestra y afectar la representatividad de los resultados.

Por otro lado, la técnica de *Pairwise deletion* elimina únicamente los registros que presentan valores ausentes en las variables específicas, que están siendo analizadas en un determinado cálculo, en lugar de eliminar la totalidad del registro. Aunque este método permite conservar más información que la supresión por listas, puede generar inconsistencias si se utiliza en análisis multivariantes, ya que el número de observaciones varía dependiendo de las combinaciones de variables evaluadas.

- *Técnicas de imputación determinística*

Dentro de esta categoría entran técnicas como *cold-deck*, *hot-deck*, el *k* - vecino más cercano, la media, la moda, imputación por regresión, entre otros. La técnica de imputación *hot-deck* se basa en la sustitución de información faltante con información de un sujeto o unidad similar. Consiste en seleccionar datos observados de un individuo llamado donante y con estos reemplazar la información faltante del individuo denominado receptor. Se supone que tienen características similares para las variables estudiadas. Por otro lado, el método *cold-deck* funciona de forma similar al método *hot-deck*, con la diferencia de que, para este, el conjunto de donantes puede ser de observaciones recolectadas en otro instante de tiempo o, de un conjunto de datos distinto.

La técnica de *k* - vecino más cercano es una herramienta muy utilizada para resolver el problema de falta de respuesta, consiste en reemplazar o imputar el valor faltante por una observación obtenida a través de la media ponderada de las distancias de las *k* - observaciones más cercanas al dato faltante. Para Zhang (2012) los métodos de imputación de *k*

- vecino más cercano pueden ser, verdaderamente, eficientes dependiendo de la métrica escogida. Por ejemplo, para variables numéricas, la distancia de Minkowski métrica de Minkowski es una muy buena elección. Es preciso indicar que esta metodología se encuentra disponible en la mayoría de software para el análisis estadístico.

La imputación de la media es un método que consiste en reemplazar los valores faltantes de una variable por su media aritmética si se trata de una variable cuantitativa, o por su moda cuando es cualitativa. Aunque este método permite completar la base de datos, de manera rápida y sencilla, presenta limitaciones, ya que reduce la variabilidad de los datos y puede generar sesgos en los análisis posteriores.

Por otro lado, el método de imputación por regresión, propuesto inicialmente por Buck (1960), utiliza un modelo de regresión, ajustado con los registros completos, para estimar los valores faltantes. En este método, los valores de la variable respuesta se imputan a partir de una o varias covariables que

se suponen correlacionadas con ella. Sin embargo, una de las principales limitaciones de esta técnica es que no tiene en cuenta la variabilidad de los datos, ya que los valores imputados provienen directamente del modelo de regresión sin considerar términos de error, lo que puede generar una sobreestimación de la correlación entre las variables.

• *Técnicas basadas en modelos probabilísticos*

Este tipo de técnicas tiene como objetivo cuantificar la incertidumbre generada, por la sustitución de valores ausentes, mediante datos imputados (Del Castillo, 2012). Una de las técnicas más reconocidas dentro de esta categoría es el algoritmo *Expectation-Maximization* (EM), el cual es un método iterativo utilizado para estimar parámetros desconocidos de una población con datos faltantes, basándose en los valores observados. El algoritmo EM se desarrolla en dos fases principales:

- **Paso Expectation (E):** Se calcula el valor esperado de los datos faltantes, dado el con-

Para corregir esta limitación, se ha propuesto la imputación por regresión estocástica, la cual introduce un término de error aleatorio a las estimaciones de regresión, reduciendo así el sesgo y reflejando mejor la incertidumbre inherente a la predicción de valores faltantes.

junto de datos observados y los valores actuales de los parámetros del modelo.

- **Paso Maximization (M):** Se maximiza la verosimilitud del modelo completando los datos con los valores estimados en el paso E. Y se actualizan los parámetros del modelo.

Este proceso se repite iterativamente hasta alcanzar la convergencia; es decir, cuando los valores estimados dejan de cambiar significativamente entre iteraciones (Lerdo de Tejada Pavón, 2014).

1. Criterios para la selección de la técnica de imputación y pasos para llevar a cabo el proceso

No existen reglas específicas para seleccionar la técnica de imputación adecuada; la decisión dependerá del tipo de datos con los que se cuenta y sus características. No obstante, Goicoechea (2002) presenta, de forma resumida, los criterios a considerar en la selección de la técnica de imputación:

- Tipo de variable a imputar: si es continua, tomar en cuenta el intervalo para el cual se define. Si es cualitativa (tanto nominal como ordinal), las categorías de las variables.
- Parámetros que se desean estimar: para conocer sólo valores agregados, como la media y el total, se pueden aplicar métodos sencillos como imputación con la media o la moda; sin embargo, puede haber subestimación de la varianza. En caso de que se requiera

mantener la distribución de la frecuencia de la variable y las asociaciones entre las distintas variables, se deben emplear métodos más elaborados, aplicando la imputación de todas las variables faltantes en el registro.

- Tasas de no respuesta y exactitud necesaria: cuando el porcentaje de no respuesta es alto en una base de datos, se considera que no hay confiabilidad en los resultados que se obtengan con el análisis de esta base.
- Información auxiliar disponible: es bueno hacer uso de la información auxiliar disponible, ya que con ella se puede deducir información de los valores ausentes de una variable.

2. Pasos para llevar a cabo el proceso de imputación

Para llevar a cabo el proceso de imputación se recomienda seguir los siguientes pasos:

Paso 1: Con la base de datos que presenta información faltante, recopilar y validar toda la información auxiliar disponible que pueda ser de ayuda para la imputación.

Paso 2: Estudiar el patrón de pérdida de respuesta. Posteriormente, observar si hay un gran número de registros que simultáneamente tienen no respuesta en un conjunto de variables.

Paso 3: Seleccionar varios métodos de imputación posibles y contrastar los resultados.

Paso 4: Calcular las varianzas para los distintos métodos de imputación seleccionados, con el objetivo de obtener estimaciones con el mínimo sesgo y la mejor precisión.

Paso 5: Concluir a partir de los resultados obtenidos.

Marco geoestadístico propuesto en el marco de la implementación del Promsea

Realizar el diseño estadístico con el cual se analizarán las variables adecuadas para determinar el estado de estos ecosistemas. Se recomienda un muestreo de tipo probabilístico ya que con este se podrá inferir sobre el total de la población. A continuación, se detallan los elementos necesarios para el diseño del muestreo:

Universo

Para el Promsea el universo de estudio está conformado por el conjunto de ecosistemas acuáticos epicontinentales, costeros e insulares ubicados en el territorio colombiano.



Río San Jorge. Ayapel - Córdoba

Población objetivo

La parte del universo sobre la cual es posible generar estimaciones debido a la exclusión de algunos elementos que no cumplen con la definición del universo, o por consideraciones prácticas del operativo (Dane, 2020).

En el caso aquí referido, son los ecosistemas priorizados de las zonas y subzonas hidrográficas, que se obtienen del cruce de capas de las fuentes cartográficas seleccionadas. Estas son:

- Mapa de zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia, escala 1 : 500.000 (Ideam, 2013a).
- Mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia, escala 1 : 100.000 (Ideam, 2017).
- Humedales Ramsar de Colombia (MinAmbiente y Convención Ramsar, 2018).
- Cuencas y UAC priorizadas con fines de ordenación por las autoridades ambientales regionales (MinAmbiente, 2021).
- Mapa categorización de SZH, según Evaluación Integrada del Agua, ENA (Ideam, 2019a).
- Mapa de análisis municipal de riesgo por cambio climático (Ideam, 2017).
- Mapa de componente étnico (ANT, 2021).

Marco estadístico

I. Es el conjunto de unidades de observación a partir de las cuales se obtienen los datos, de acuerdo con las variables definidas. Para el caso de las encuestas por muestreo recibe el nombre de marco muestral; para el caso de censos se denomina marco censal. Su diseño debe incluir las variables que permiten caracterizar, identificar y ubicar las unidades de observación, así como la metodología de construcción y actualización. Es importante indicar el medio en el que se encuentra el marco: listado en papel, cartografía, medios magnéticos, entre otros (Dane, 2014).

II. La integridad del marco: debe provenir de un organismo confiable que asegure la veracidad y completitud de la información.

III. Seguridad de la información del marco: los medios o mecanismos de almacenamiento deben garantizar la confidencialidad e invulnerabilidad de la información que contiene el marco.

Por lo anterior se propone que el marco geoestadístico sea el resultado del análisis integrado de la información cartográfica seleccionada para la priorización de unidades de análisis de ecosistemas acuáticos. En este caso es la superposición de capas geográficas propuestas para la priorización, en la selección de la población objetivo.

Fuente de datos

La información estadística puede provenir de fuentes primarias o secundarias. La fuente primaria es aquella información que se obtiene directamente

de las unidades que suministran los datos y corresponden a operaciones estadísticas por censo y muestreo (Dane, 2020).

La fuente secundaria es aquella que ofrece información sobre el tema que se va a investigar, pero que se obtiene a partir de otras operaciones estadísticas o de registros administrativos. Cuando este sea el caso debe registrarse la cantidad de fuentes y relacionarlas (Dane, 2020).

El Promsea es una operación estadística por muestreo, las fuentes de información secundarias son:

El SIAC, que está integrado por:

1. SIRH
2. SiAM
3. SiB
4. SNIF

Cobertura geográfica

La cobertura geográfica, en una operación estadística, se refiere a la extensión territorial sobre la cual se lleva a cabo el estudio, pudiendo ser nacional, regional o departamental (Dane, 2020). Para el

Desagregación geográfica

Se refiere al nivel de detalle de una división territorial con el que se agrega la información para su difusión, de acuerdo con la cobertura geográfica total, nacional, departamental, entre otros (Dane, 2020). La desagregación planteada para el Promsea es:

Desagregación temática

La desagregación temática hace referencia al nivel de detalle del tema de estudio con que se requiere difundir la información; igualmente, se establece en la planeación del proyecto (Dane, 2014).

5. SMByC
6. SIAT- PC
7. SIAT- AC
8. RUA UNIFICADO
9. SIPGA
10. DHIME

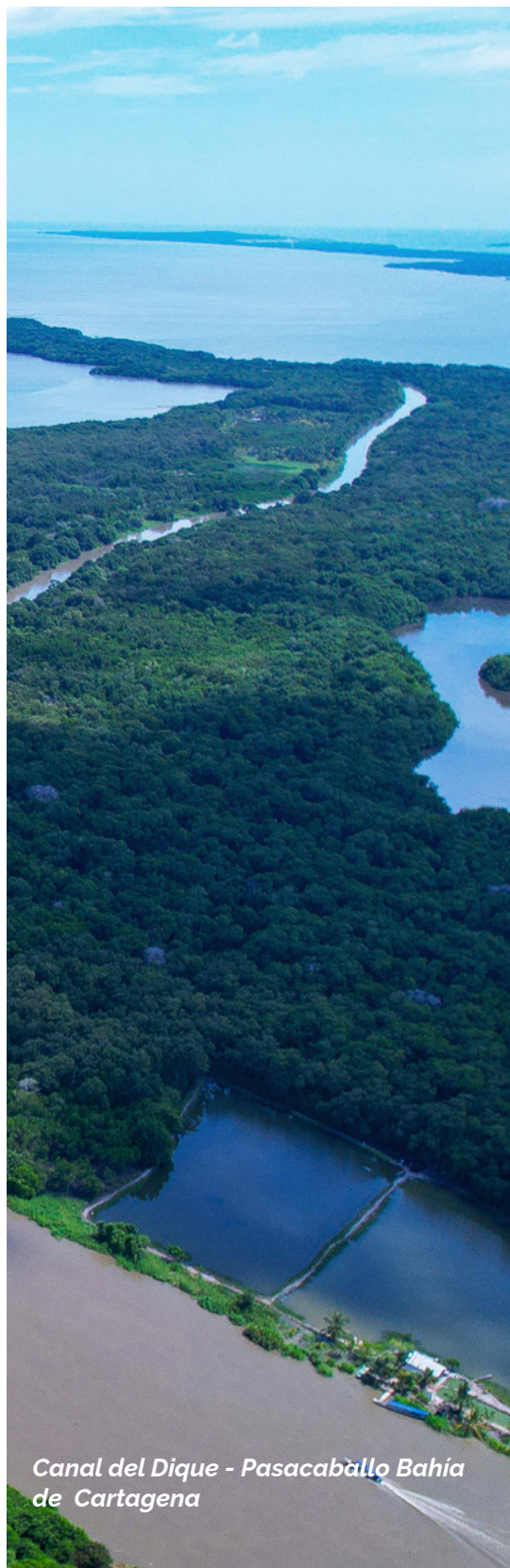
Las instituciones encargadas del levantamiento de información ambiental en el país son:

1. Corporaciones autónomas regionales
2. Institutos de investigación
3. Otras instituciones del SINA

Promsea, la cobertura geográfica abarca el territorio colombiano en sus componentes epicontinental, costero e insular, con un enfoque particular en las unidades priorizadas.

- Nacional: áreas hidrográficas.
- Regional: SZH y UAC.
- Local: ecosistemas síntesis del MEC, en ventanas piloto de implementación.

La información recolectada con la implementación del monitoreo de ecosistemas acuáticos tiene su desagregación temática partiendo de:



Canal del Dique - Pasacaballo Bahía de Cartagena

- Tipos de ecosistemas síntesis, por cada ambiente acuático (epicontinentales: lóticos, lénticos, transicionales y artificiales; incluidos costeros e insulares) para cada SZH y cada UAC.
- Fenómenos de transformación, según carga contaminante, fragmentación y cambio climático.
- Componentes de monitoreo dentro de cada fenómeno de transformación: hidrológico, hidrobiológico, físico y socioeconómico.

Unidades estadísticas

Comprende la unidad de observación, la unidad de análisis y la unidad de muestreo.

Unidad de análisis

En una medición, la unidad de análisis es el elemento de estudio. Es sobre esa unidad que se presentan los resultados o las conclusiones de la operación estadística adelantada (Dane, 2020).

Se propone que, de acuerdo con los objetivos del Promsea, la unidad de análisis tenga tres niveles de desagregación (ver detalles en Tabla 56), así:

- **En el Nivel 1:** SZH y UAC.
- **En el Nivel 2:** lóticos, lénticos, transicionales, artificiales, costeros e insulares.
- **En el Nivel 3:** Ecosistemas síntesis del MEC.

Unidad de muestreo

Describe el elemento o el conjunto de elementos definidos o establecidos a ser seleccionados en la muestra. Una operación estadística puede tener varias unidades de muestreo y es necesario describir sus características (Dane, 2020).

Para el protocolo se proponen varias unidades de muestreo, las cuales se diferencian según el tipo de ecosistemas a monitorear y depende del fenómeno de transformación (carga contaminante, fragmentación y cambio climático) que se prioriza sobre el ecosistema a estudiar. Se plantean como

unidades de muestreo, transectos, grillas, cuadrantes, encuestas a comunidades, entre otros. Este tipo de muestreo también está sujeto a la información y presupuesto disponible en el momento de llevar a cabo la implementación del protocolo, en las ventanas piloto.

Unidad de observación

Elemento o conjunto de elementos sobre los que se hace medición de las diferentes variables en una operación estadística. La información sobre sus características depende de la operación estadística (Dane, 2020). Para el Promsea, las unidades de observación se agrupan en los cuatro componentes que aborda el protocolo (hidrológico, hidrobiológico, físico y socioeconómico). Las unidades de observación para los componentes hidrológico, hidrobiológico y biofísico son: el agua, los sedimentos (lechos acuáticos), los suelos y la atmósfera. Para el componente socioeconómico se plantean como unidades de observación: la población y los sectores económicos.

De tal manera que, para el Promsea se desarrolló el siguiente esquema:

- **Universo:** Ecosistemas acuáticos epicontinentales, costeros e insulares de Colombia.
- **Población objetivo:** Ecosistemas acuáticos epicontinentales, costeros e insulares de las SZH y las UAC priorizadas.
- **Marco geoestadístico:** la ubicación de la población se obtiene del cruce de mapas que resulta en unas SZH y UAC prioritarias. La ventana piloto de implementación está contenida dentro de la población.

Tabla 56. Unidades estadísticas del Promsea

Unidades estadísticas del Promsea		
Unidad de análisis	Unidad de observación	Unidad de muestreo
Nivel 1: SZH y. Nivel 2: lóticos, lénticos, transicionales, artificiales, costeros e insulares. Nivel 3: Ecosistemas síntesis del MEC.	Agua, sedimentos (lechos acuáticos), suelos, atmósfera, población y sectores económicos.	Cuadrantes, transectos, grillas, entre otros.

Desagregación temática:

1. Fenómenos de transformación: carga contaminante, fragmentación, cambio climático.
2. Componentes: físico, hidrológico, hidrobiológico y socioeconómico.

Pasos para la generación del índice integrado

La siguiente propuesta metodológica para la construcción del índice integrado de ecosistemas acuáticos consta, fundamentalmente, de once pasos, los cuales se describen a continuación:

1. Tipo de estudio: Determinar si el estudio es realizado por muestreo probabilístico, censo o si es un estudio de caso. Se puede hacer inferencia estadística para los dos primeros. Pero si es un estudio de caso, las conclusiones del índice construido serán válidas únicamente para los individuos observados.

2. Calidad de la información: Para garantizar la buena calidad de la información se deben evaluar los instrumentos utilizados para su recolección (formularios, manuales y proceso de capacitación), ya sea que ésta se encuentre recolectada o que se planee su recolección. En este sentido, se debe garantizar la estandarización de la medición de cada variable, lo mismo que la fecha y periodo a la cual hace referencia la información. Combinar bases de datos provenientes de procesos no compatibles genera distorsiones en la elaboración de cualquier índice o indicador. La estadística, como ciencia, requiere de unos insumos que cumplan con mínimos estándares de calidad, para que así los modelos que sean elaborados con técnica y tengan validez tanto a la luz de la realidad como de las matemáticas.

3. Validación y consistencia: En el proceso de recolección de la información, siempre se debe contar con herramientas de validación de la consistencia interna de los datos (relaciones intrínsecas existentes entre distintas variables), como de la consistencia externa (relación extrínseca entre las variables a utilizar y otras variables de contexto). Los datos deben responder a una realidad holística del fenómeno en estudio y no solamente a un particular contexto geográfico, demográfico, social y/o

económico. Para lo anterior, hay que acudir al uso de modelos determinísticos, modelos de la estadística clásica como a modelos de la geoestadística, siendo éstos últimos de gran ayuda para fenómenos como los que trata la elaboración del índice propuesto. Existe una probable correlación entre las variables de estudio por la localización o vecindad geográfica entre las unidades de observación. De ahí que se determinen reglas de validación y consistencia de los datos ya recolectados o por recolectar. Con el proceso de validación se definen los valores que, en forma individual, pueden asumir las variables, y con el de consistencia se establecen las relaciones que deberían existir entre unas variables y otras (Dane, 2014).

4. Variables completas: Las variables deben estar bien recogidas en el sentido de su completitud, de no ser así se debe realizar un proceso de imputación estadística que consiste en estimar los valores ausentes. La estimación se puede hacer a partir de la información del conjunto completo de variables o bien de algunas variables especialmente seleccionadas. La imputación estadística debe ser no mayor al 2 % de la información faltante. En caso de que una variable tenga excesiva información faltante debe ser eliminada o puede ser reemplazada por otra con la que esté altamente relacionada.

5. Análisis discriminante: Se deben identificar las variables que tengan mayor potencial en la explicación del fenómeno de estudio mediante un análisis discriminante, el cual consiste en la formación de dos grupos. Uno de ellos con las variables que realmente son importantes en la discriminación del fenómeno, y el otro grupo con variables que no aportan en esa dirección, las cuales se excluirán automáticamente de la construcción del índice.

6. Marco teórico: Las necesidades de la modelación estadística pasan por el desarrollo de un marco teórico que define con claridad los objetivos que se persiguen, los elementos teóricos que los respaldan y el delineamiento de la forma como las mediciones requeridas ayudan a solucionar el problema en estudio. Este trabajo es de total responsabilidad de los expertos del tema a tratar. Una vez el marco teórico ha sido definido, es deber del estadístico la tarea de digerirlo y comprenderlo, para luego proponer el uso de las herramientas estadísticas apropiadas a las necesidades de la investigación. Luego, los expertos han de comprender cómo las herramientas estadísticas les ayudarán a solucionar el problema objeto de estudio. Todo lo anterior llevará a que exista una intercepción de conocimiento entre expertos y estadísticos que los lleve a hablar un mínimo de lenguaje en común. De esta manera, se facilitará el logro de los objetivos perseguidos, en cuanto a que todas las partes involucradas podrán aportar, en alguna medida, a la solución del problema real. La matemática deducirá modelos de comportamiento del fenómeno en estudio, que reflejarán una realidad, sin que éstos sólo hagan parte de una teoría estadística. Un estadístico descontextualizado de la realidad es tan poco eficiente como un experto que no quiera respetar los mínimos requerimientos de rigurosidad estadística.

7. Análisis factorial: El marco teórico define unas dimensiones o factores que explican el fenómeno y que muestran las diferentes caras que tiene el fenómeno en estudio. A nivel estadístico, el análisis factorial corrobora lo que el marco teórico ha definido y ayuda a afinar las dimensiones o grupos de variables, desde el ángulo cuantitativo, con el uso de herramientas matemáticas diseñadas para tal fin. Entonces, a través del análisis factorial se de-

finirá cómo optimizar el agrupamiento de las variables a utilizar, y se determinará el peso relativo que cada variable tendrá dentro del factor y cuánto pesa cada factor dentro del índice. Una vez más, los resultados estadísticos deben guardar coherencia con el mundo real en el cual se desenvuelve el fenómeno en estudio, pero de igual manera, el marco teórico debe guardar una coherencia con el mundo cuantitativo en el que se desarrolla el fenómeno de interés.

8. Categorizar las variables: Para que el índice sea operativo y utilizable a través del tiempo, se deben categorizar todas las variables que ya fueron seleccionadas, y con estas conformar el índice. La categorización de las variables cuantitativas debe ser con un criterio estadístico y la puntuación que se les da a las variables nominales a juicio de expertos.

9. Análisis de componentes principales: Una vez se tengan las variables categorizadas, se aplica un análisis de componentes principales cualitativo. De esta manera se asigna un valor numérico a las categorías de las variables en cada componente, y con el mínimo número de estas se explica la mayor cantidad de varianza del problema de estudio.

10. Crear el índice: El índice resultante será la suma del valor de cada categoría de cada variable multiplicado por la ponderación de la variable dentro del factor, y este a su vez multiplicado por la ponderación de cada factor dentro del índice. Para facilitar el uso del índice se lleva a cabo una transformación lineal de forma tal que la suma de los máximos valores de cada categoría de las variables sea igual a cien y, a todas las categorías de menor valor de cada variable se les asigne un valor de cero. Así se garantiza que el índice tenga un valor entre cero y cien.

11. Validar el índice: La mejor manera de validar el índice es aplicárselo a cada uno de los elementos que participaron dentro del índice y con los expertos, verificar si corresponde a la realidad de la medición del fenómeno. Otra forma de hacerlo es aplicar el índice con nueva información y analizar los resultados con

los expertos. Esto lleva a que se trabaje de la misma forma inicial; es decir, como para la conformación de la base de datos se utilizaron formularios, manuales de recolección y un proceso de capacitación para la recolección de los datos, para alimentar el índice usar el mismo proceso.

Actores y acuerdos institucionales para la implementación y validación nacional y regional del Promsea

Si bien el Promsea fue construido evaluando primero los procesos y el tipo de información que el Ideam origina, es importante comprender que muchas de las variables incluidas en los modelos conceptuales y metodológicos sobre los fenómenos de transformación corresponden a la misionalidad de otras entidades ambientales. Estas entidades son responsables de su levantamiento y reporte, a través de diversos sistemas o plataformas de información. Para garantizar una implementación y

validación efectiva, es necesario identificar los actores que pueden apoyar y ejecutar el monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos priorizados, en las diferentes áreas hidrográficas del país.

En este contexto, a continuación, se presentan las actividades desarrolladas con el propósito de fortalecer la articulación interinstitucional, un proceso esencial para la consolidación de la Fase III del Promsea.

Identificación preliminar de posibles ventanas piloto de implementación del Promsea

Corresponde a la consolidación de la estrategia de implementación y validación en ventanas piloto. En esta fase, se buscaba que, a partir de la identificación de una o varias ventanas piloto, se pongan en práctica las metodologías de monitoreo propuestas para cada uno de los fenómenos de transformación priorizados. Adicionalmente, se llevará a cabo un análisis del estado de la información existente a nivel nacional y regional, con relación a las variables mínimas establecidas en el protocolo.

Durante las Fases I y II, se adelantaron actividades orientadas al acercamiento con diferentes entidades del SINA, a través de reuniones, talleres y encuestas. Estas instancias permitieron identificar los

ecosistemas acuáticos con mayor disponibilidad de información, derivada de procesos de monitoreo que consideran los cuatro componentes del protocolo: calidad del agua, comunidades hidrobiológicas, aspectos físicos y socioeconómicos. Además, se evaluaron dos criterios para la implementación y sostenibilidad del monitoreo:

- Disponibilidad de recursos financieros, esenciales para garantizar la continuidad del proceso.
- Accesibilidad y seguridad de las estaciones de monitoreo, aspectos determinantes para su operatividad.

Como resultado de este proceso, se identificaron 32 áreas/ecosistemas donde, actualmente, se realiza monitoreo o donde se considera necesario iniciarlo, debido a las presiones existentes. A partir de estos resultados, se preseleccionaron ocho eco-

sistemas acuáticos, distribuidos en todas las áreas hidrográficas del país, que cumplen con la mayoría de los criterios establecidos para considerarse posibles ventanas piloto para la implementación y validación del Promsea (Ver Tabla 57 y Figura 59).

Tabla 57. Áreas o ecosistemas priorizados como ventanas piloto de implementación

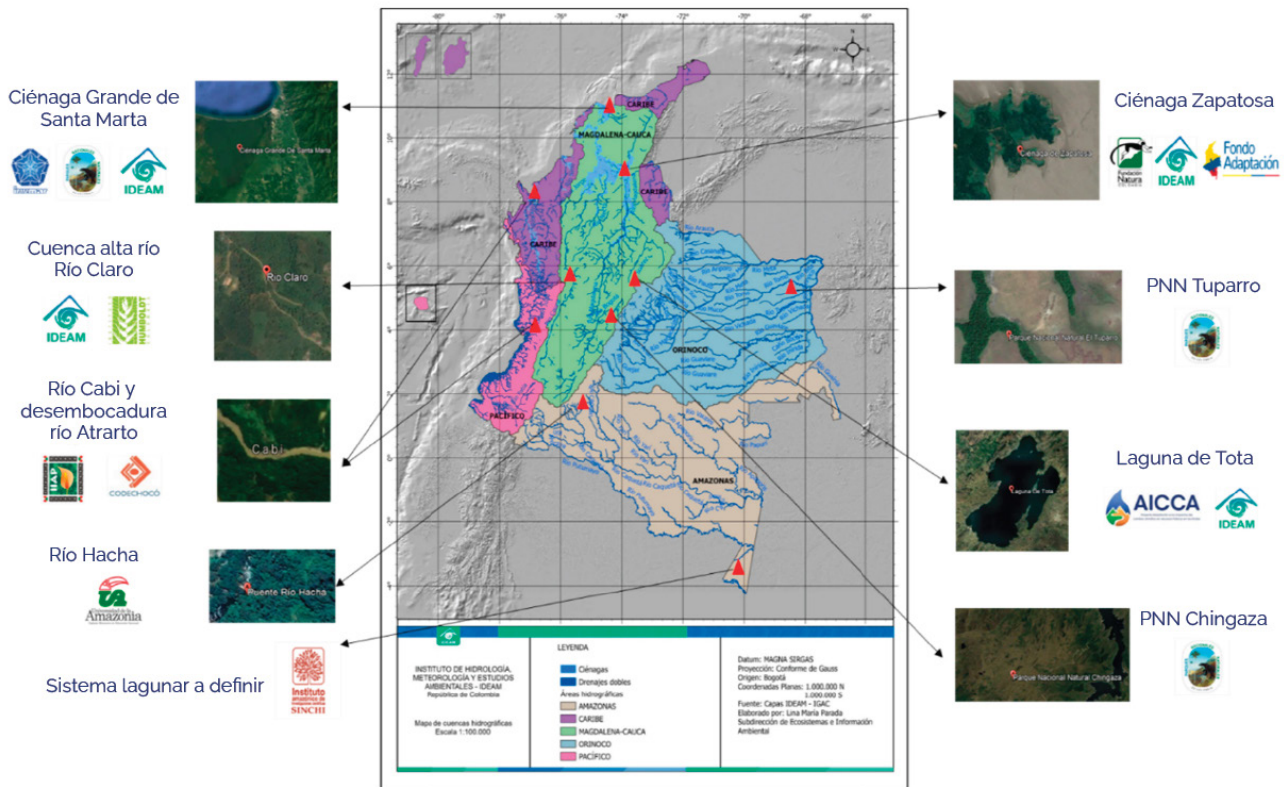
Ecosistemas priorizados		
Entidad	Territorial/Escala de monitoreo	Área/Ecosistema
PNN	Amazonia	Alto Fragua Indiwasi
	Orinoquía	El Tuparro
	Orinoquía	Chingaza
	Pacífico	Farallones
	Andes occidentales	Galeras
	Andes nororientales	Iguaque, Pisba, Yariguíes
	Caribe	Corchal
Anla	Cuenca	Río Tillavá
	Cuenca	Río Ranchería
	Cuenca	Río Cusiana
	Cuenca	Río San Jorge
	Cuenca	Medio Magdalena (Valle Medio Magdalena)
	Zona Minera	Río del Cesar

Ecosistemas prioritizados

Entidad	Territorial/Escala de monitoreo	Área/Ecosistema
Anla	Cuenca	Río Tillavá
	Zona	Unidad acuífero grupo Real localizado en el Valle del Medio Magdalena
	Zona	Sistema Acuífero Neiva - Tatacoa – Gigante, en el Valle Superior del Magdalena.
	Cuenca	Unidad acuífero grupo Guayabo, localizado en el Alto Vichada, río Guarrojo y río Muco.
Invemar	Lagunas costeras y estuarios	Ecorregión Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM)
IIAP	Subcuenca	Río Negua
	Microcuenca	Quebrada Doña Josefa
	Subcuenca	Río Tutunendo
	Local	Humedales de Quibdó (San Antonio)
	Local	Humedales de Quibdó (Duatá)
	Local	Humedales de Quibdó (Troje)
	Microcuenca	Quebrada Giginia
	Subcuenca	Río Cabí
	Subcuenca	Río Atrato (Desembocadura Golfo de Urabá)
	Microcuenca	Río Truandó

Ecosistemas prioritizados		
Entidad	Territorial/Escala de monitoreo	Área/Ecosistema
IIAP	Microcuenca	Río Salaquí
	Microcuenca	Río Domingodó
Sinchi	Macrocuena	Amazonas y Orinoco
Instituto Humboldt	Cuenca	Ríos jurisdicción Corantioquia del Programa Piragua

Figura 59. Identificación preliminar de ventanas piloto para la implementación del Promsea



Nota: Elaborado a través de ejercicios de priorización con delegados de las entidades del SINA.



Canal del Dique - Pasacaballo Bahía de Cartagena



Variables complementarias: la importancia de la regionalización para el monitoreo de los ecosistemas acuáticos

Los sistemas ecológicos, en los países tropicales, presentan una gran variabilidad y diversidad, lo que dificulta su estudio (Campero *et al.*, 2003). Para abordar esta complejidad, se deben identificar patrones o modelos que permitan simplificar la información y facilitar la comprensión y predicción de sus características. Una estrategia eficaz es la delimitación de regiones, entendidas como un mosaico o complejo regional de paisajes y ecosistemas (Forman y Godron, 1986), que abarcan territorios extensos con cierta homogeneidad en sus componentes climáticos, geológicos, hidrológicos, edáficos y bióticos (Sukachev y Dylis, 1964). Estos complejos de ecosistemas tienden a formar patrones repetitivos en respuesta a la geomorfología y la edafología subyacentes (Morello *et al.*, 2007) y comparten características estructurales y funcionales similares.

En el caso de los ecosistemas acuáticos de Colombia, la necesidad de que las herramientas de análisis, como índices e indicadores de calidad y salud ecosistémica, reflejen la diversidad ecológica del país implica un proceso de regionalización. Este consiste en la adaptación de dichas herramientas a áreas con características ambientales comunes, permitiendo incorporar la heterogeneidad ecológica dentro de un determinado espacio geográfico. Comprender la jerarquía espacial de los componentes regionales permite la identificación de los factores que influyen en las respuestas de los sistemas acuáticos a las condiciones naturales, diferenciando así la variación natural de las alteraciones de origen humano.

El concepto de región acuática abarca los ecosistemas hídricos, sus comunidades biológicas y las unidades de terreno relacionadas con estos ambientes (Omernik, 1987; Zuo *et al.*, 2010). La regionalización de los ecosistemas acuáticos puede abordarse considerando la tipología de Omernik

(1987) que tiene cuatro características principales: tipos de suelos, vegetación natural, topografía y uso del suelo. En otros enfoques, la regionalización limnológica ha integrado factores como el clima e incluso las características de los microhábitats acuáticos (Cheruvelil *et al.*, 2008). El objetivo central es revelar la estructura jerárquica y la variabilidad espacial de los ecosistemas acuáticos, a escala regional (Pinilla, 2017).

Es importante que las regiones hídricas establecidas mantengan una similitud interna y sean diferenciables de otras regiones (Gao *et al.*, 2011). En otras palabras, los ecosistemas acuáticos de una región deben compartir la mayor cantidad posible de similitudes en términos de estructura y función, al tiempo que se distinguen de los cuerpos de agua de otras regiones acuáticas (Pinilla, 2017). La regionalización no se centra en describir la variación local dentro de los ecosistemas acuáticos, sino en identificar patrones de organización a gran escala. Entre sus principales ventajas se encuentran la posibilidad de conocer tanto la estructura del ecosistema (principales componentes del sistema natural y sus factores de control) como su funcionalidad (capacidad de evolución y permanencia). Además, permite agrupar ecosistemas, según su dinámica temporal de cambio, ya sea por factores geológicos, climáticos o antrópicos (Torregroza *et al.*, 2014).

Cuando la regionalización se basa en análisis estadísticos robustos, se pueden realizar extrapolaciones a otros sistemas acuáticos de la región para los cuales no se dispone de información de campo. Esto refuerza el diseño de programas de monitoreo, dado que permite asumir que las características de los ríos y lagos dentro de una misma región son más similares entre sí que con ecosistemas acuáticos de otras regiones (Cheruvelil *et al.*, 2008).

La zonificación hidrográfica como punto de partida para la regionalización

Colombia cuenta con una zonificación hidrográfica definida a partir de las características de sus cuerpos de agua epicontinentales. Esta zonificación considera aspectos como la dirección del flujo, el orden de magnitud, la divisoria de aguas y la estructura general de la red de drenaje. A partir de estos criterios, se establecieron tres niveles jerárquicos para la delimitación de cuencas hidrográficas: áreas, zonas y subzonas hidrográficas. En este contexto, la cuenca se define como el área de drenaje de un curso de agua superficial o subterráneo, ya sea un río o un lago (Ideam, 2013a). Dentro de la cuenca se expresa el ciclo hidrológico, estando delimitada por divisorias de agua, las cuales funcionan como fronteras naturales del sistema. El propósito del Ideam con esta zonificación fue clasificar y priorizar unidades de análisis que facilitarían la ordenación y gestión del recurso hídrico, aunque sin incluir explícitamente el componente biótico (Mesa *et al.*, 2016).

En cuanto a la zona costera de Colombia, esta comprende la franja del litoral que se extiende 2 kilómetros tierra adentro, desde los ecosistemas de influencia marina, las áreas marinas protegidas y los centros poblados costeros. Su extensión emergida (continental e insular) es de 16.128 km², aunque su delimitación también abarca la plataforma continental mar adentro. En la mayoría de los casos, el límite exterior de la plataforma continental coincide con la isóbata de 200 metros, y en términos generales, la zona costera marina representa, aproximadamente, un 6 % de las aguas jurisdiccionales del país (Invemar, 2020).

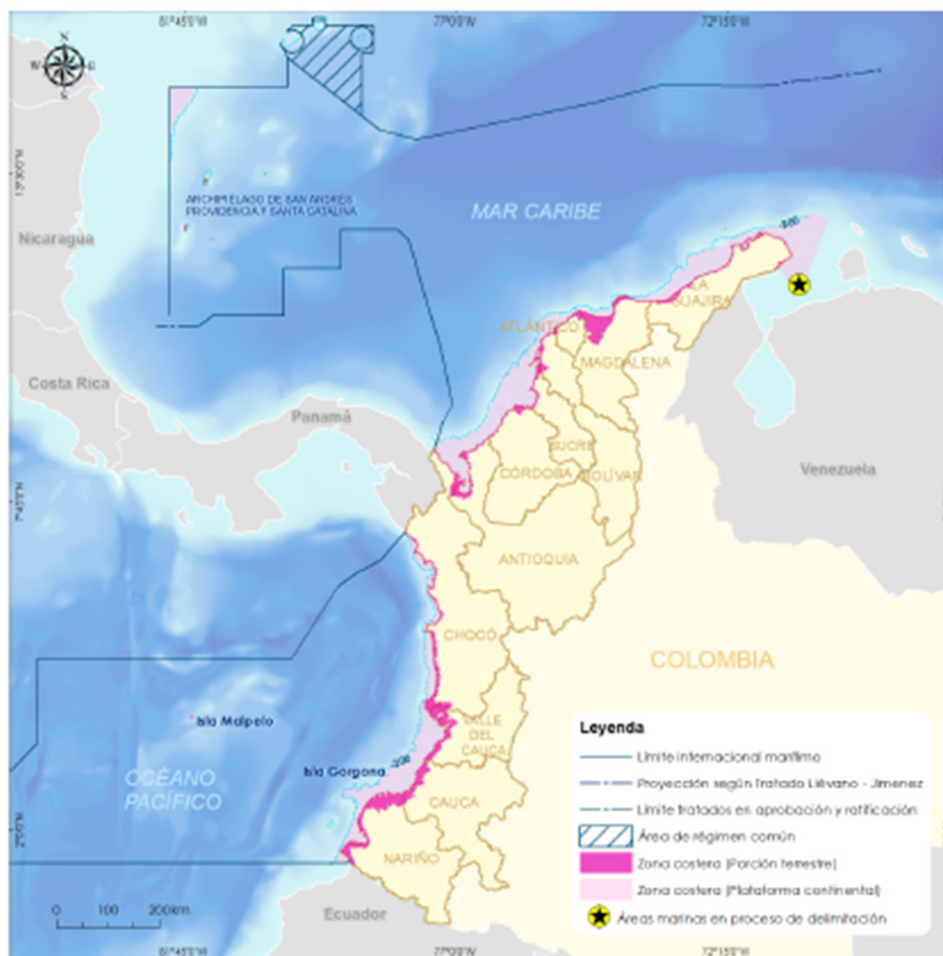
Con base en esta zonificación, el país se divide en dos regiones marinas y costeras. La región Caribe cuenta con una zona costera emergida de 7.673 km² y una superficie de aguas jurisdiccionales de 532.154 km² (Figura 60). Su costa continental abarca los departamentos de La Guajira, Magdalena, Atlántico, Bolívar, Sucre, Córdoba, Antioquia y Chocó,

bajo la jurisdicción de 11 autoridades ambientales. Dentro del Caribe insular continental se encuentran los archipiélagos de las islas del Rosario y de San Bernardo, localizadas en la plataforma continental, frente a los departamentos de Bolívar y Sucre (Maldonado *et al.*, 1998). Adicionalmente, la costa Caribe insular oceánica está conformada por el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, junto con sus islotes y cayos asociados, con una línea de costa de aproximadamente 100 kilómetros y un área terrestre de 49 km² (Posada *et al.*, 2011).

La región del Pacífico comprende los departamentos de Chocó, Valle del Cauca, Cauca y Nariño, bajo la jurisdicción de cuatro autoridades ambientales (Figura 60). Su costa se divide en dos sectores principales: la zona norte, ubicada entre la frontera con Panamá y cabo Corrientes, con una longitud aproximada de 375 kilómetros, y la zona sur, que se extiende desde cabo Corrientes hasta el límite con Ecuador, caracterizada por la presencia de planos inundables cubiertos por manglares (Posada *et al.*, 2009).



Figura 60. Regiones costeras, insulares y marinas de Colombia



Fuente: Invermar (2020).

Por otro lado, de acuerdo con lo establecido en la Política Nacional Ambiental para el desarrollo sostenible de los espacios Oceánicos y las zonas Costeras e Insulares de Colombia (PNAOCI), el país se ha dividido en tres grandes regiones integrales de planificación oceánica y costera, cada una con dinámicas y características particulares. Estas regiones fueron definidas para la administración de las zonas costeras y agrupadas estratégicamente, según criterios ecosistémicos, problemáticas y diagnósticos específicos. Dichas regiones son:

- Región Caribe Insular.
- Región Caribe Continental y Oceánico.
- Región Pacífico Continental y Oceánico (Invermar, 2020).

Dentro de cada región, se han delimitado unidades ambientales y geográficas continuas, clasificadas según los ecosistemas predominantes. Estas unidades, denominadas Unidades Ambientales y

Costeras Oceánicas (Uaco), suman un total de 12 y se dividen en costeras y oceánicas. Según Inve-
 mar (2020), la delimitación de la zona costera bajo
 el esquema de las Uaco está respaldada por la Ley

1450 de 2011, el Decreto 1120 de 2013 y el Decre-
 to Único Reglamentario 1076 de 2015. La Tabla 58
 presenta la distribución geográfica de las Uaco, en
 cada región.

Tabla 58. Unidades Ambientales Costeras y Oceánicas de Colombia

Región integral de planificación	Unidad Ambiental
Caribe Insular	Unidad Ambiental Caribe Insular – Reserva de Biósfera <i>Seaflower</i>
Caribe y Pacífico continental y oceánica	Unidad Ambiental Costera de la Alta Guajira
	Unidad Ambiental Costera de la vertiente Norte de la Sierra Nevada de Santa Marta
	Unidad Ambiental Costera del río Magdalena complejo canal del Dique – sistema lagunar de la CGSM
	Unidad Ambiental Costera Estuarina del río Sinú y el golfo de Morrosquillo
	Unidad Ambiental Costera del Darién
	Unidad Ambiental Caribe Oceánico
	Unidad Ambiental Costera Pacífico norte chocono
	Unidad Ambiental Costera del Baudó - San Juan
	Unidad Ambiental Costera del complejo de Málaga – Buenaventura
	Unidad Ambiental Costera de la Llanura Aluvial Sur
	Unidad Ambiental Pacífico Oceánico

Fuente: Inve-
 mar (2020).

Propuesta de ruta metodológica para la regionalización de variables, índices e indicadores mínimos desde el componente de geomorfología y suelos para el monitoreo de los ecosistemas acuáticos del país

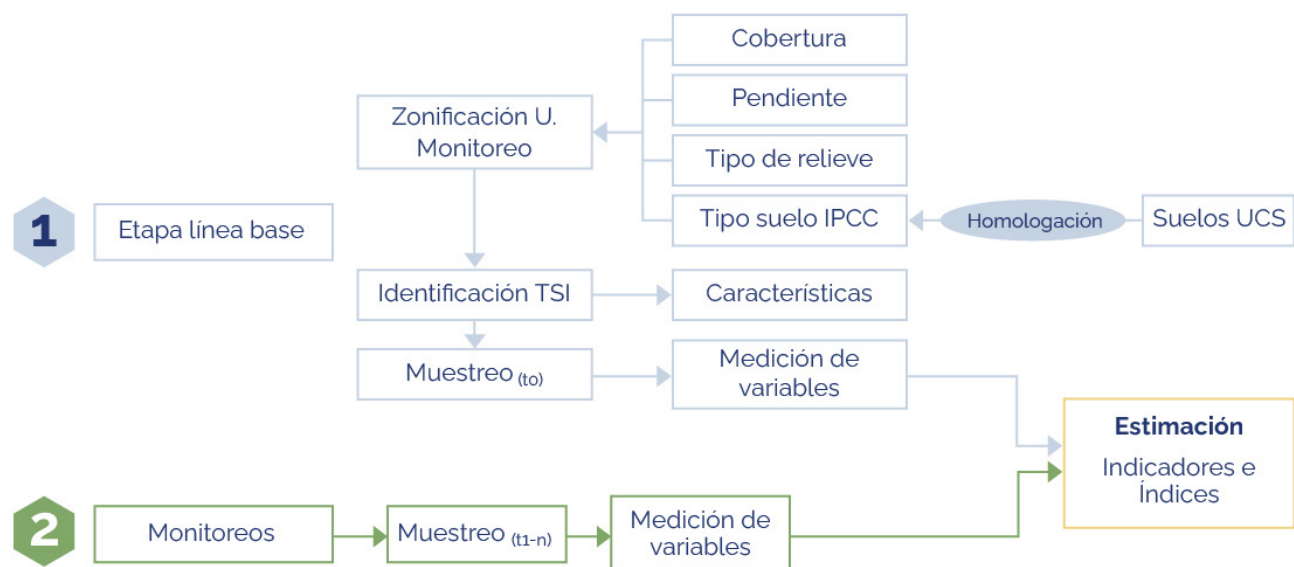
Para el monitoreo y la regionalización se proponen dos etapas. La primera consiste en la construcción de una línea base, que incluye la zonificación y la definición de unidades de análisis o muestreo. En esta fase, se seleccionan variables para caracterizar el territorio, entre ellas aquellas que aporten información relevante sobre la dinámica del ecosistema. Por ejemplo, se incluyen variables geomorfológicas y edafológicas, y se complementan con datos sobre cobertura y pendiente.

La segunda fase corresponde a los monitoreos, en los cuales se miden directamente variables asociadas a procesos o cambios en las propiedades y características de los suelos. La realidad es que hay muchas posibilidades, pero como no es viable me-

dir todas las posibles. Entonces, es necesario priorizar las variables que permitan detectar tendencias y evaluar, efectivamente, el estado del ecosistema.

Las variables geomorfológicas y edafológicas pueden cumplir dos funciones principales: caracterización y monitoreo. Las de caracterización se utilizan para identificar las unidades de análisis y los suelos a monitorear, y generalmente se determinan una única vez (ver Figura 61). Estas pueden obtenerse a partir de información secundaria, como datos geomorfológicos sobre el tipo o la forma del relieve, los cuales requieren verificación en campo. En contraste, las variables de monitoreo permiten evaluar los cambios en el tiempo y, requieren la toma directa de datos en campo.

Figura 61. Esquema general, según la escala de monitoreo, para el componente de geomorfología y suelos



A continuación, se presentan las metodologías específicas propuestas para cada escala de monitoreo.

Zonificación

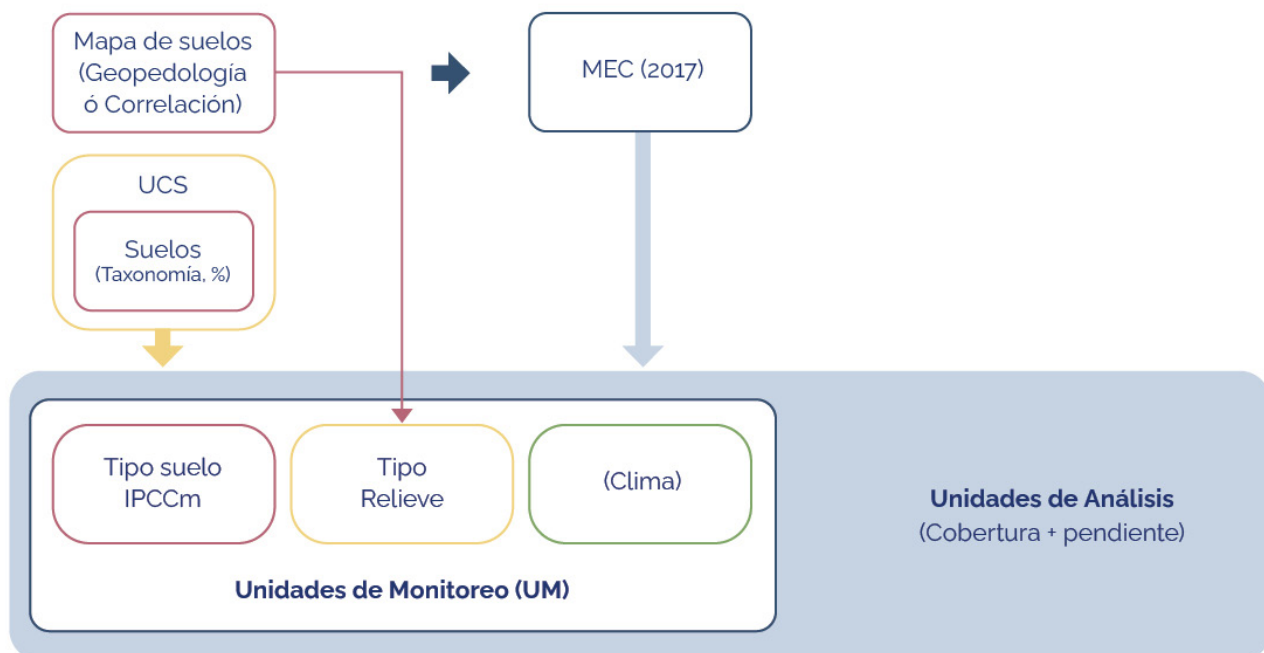
Como se observó en la propuesta de zonificación, es importante definir las Unidades de Monitoreo (UM), a partir de la integración de información de geomorfología, de suelos (reemplazando el atributo material parental por tipo de suelo IPCC modificado). Además de las variables de cobertura y pendiente, se deben incluir las unidades climáticas.

Para el primer ajuste, el tipo de suelo IPCC modificado que permite agrupar los suelos por condiciones relacionadas con los tres fenómenos a evaluar, se requiere generar un algoritmo estandarizado para la homologación de suelos de Co-

lombia. El segundo ajuste, corresponde a la inclusión de las unidades climáticas como elemento para la definición de unidades de análisis.

Sin embargo, debido a que los mapas climáticos son realizados mediante procesos de interpolación de información meteorológica y por lo tanto su precisión depende de la densidad de las estaciones, las unidades climáticas no son naturales. Y como cambian, por su propia dinámica, se sugiere que se utilicen las unidades climáticas definidas en el MEC (ver Figura 62).

Figura 62. Propuesta para zonificación de UM, a partir del componente de geomorfología y suelos



Las variables de zonificación propuestas para incluir en la definición de unidades de análisis son: el tipo de suelo, el porcentaje de tipo de suelo por unidad cartográfica de suelos, la pendiente y el cli-

ma. Las características asociadas a estas unidades de análisis son el ambiente edafogenético, el tipo de epipedón (horizonte superficial), el espesor del epipedón, la textura y el color (ver Tabla 59).

Tabla 59. Características o atributos para zonificación y caracterización LB

Objetivo	Atributo	Característica
Zonificación	UCS	Taxonomía, porcentaje por unidad de suelo
	UCS IPCC	Tipo de suelo IPCC Porcentaje por unidad de suelo
	Pendiente	Inclinación (%) E1 : 100.000 (MEC / Igac) E1 : 25.000 Modelo de elevación digital (DEM)
	Clima	Zonas climáticas que incluyan piso térmico y provincia de humedad
Caracterización	Ambiente edafogenético	Tipo de Ambiente
	Horizonte superficial	Tipo Epipedón, Espesor, Textura, Color

Homologación suelos USDA a IPCC modificado (IPCCm)

El IPCC define siete tipos de suelos: orgánicos, de humedal, arenales, volcánicos, espódicos, de Arcillas de Baja Actividad (LAC, por su sigla en inglés) y de Arcillas de Alta Actividad (HAC, por su sigla en inglés) como directriz para estimar emisiones de Carbono y GEI. Para homologar los tipos de suelos del sistema de clasificación USDA al IPCC se ha establecido una metodología (IPCC, 2006). La cual fue aplicada para Colombia (Neira *et al.*, 2017) y se concluyó que es necesario incluir otros tipos de suelos para Colombia y países de latitudes y geo-

grafía similar, que no están considerados dentro de estos siete tipos.

Con base en la información disponible de suelos para Colombia, estructurada en el mapa de Geopedología (Igac, 2014), se realiza una propuesta para suelos de ecosistemas acuáticos, en la que se definen los siguientes tipos de suelos: orgánicos, arenosos, de arcillas de baja actividad, de arcillas de alta actividad y otros suelos minerales,

todos de condiciones hidromórficas. Es decir que, aplica para suelos con condiciones cuicas (que se inundan o encharcan temporalmente), incluyendo suelos que son sometidos a prácticas como el riego prolongado (para cultivos de arroz bajo inunda-

ción). El diagrama de la Figura 63 presenta la propuesta para la homologación de suelos de sistema de clasificación taxonómico USDA al propuesto IPCCm (IPCC modificado).

Figura 63. Esquema para homologación de suelos de Sistema USDA a IPCCm



Si el suelo es un Histosol, con más de 30 cm de espesor, es considerado un suelo orgánico; si el suelo tiene más de 70 % de arenas y menos de 10 % de arcillas corresponde a un suelo de arenales; si el suelo es un Andisol (está formado a partir de cenizas volcánicas que han generado un tipo de arcillas alófanas) se denomina volcánico; si los suelos están conformados por materiales arcillosos de baja actividad como ultisoles, oxisoles y ciertos alfisoles, se denominan LAC; si por el contrario, corresponden a molisoles, vertisoles y otros suelos ricos en arcillas 2 : 1, de alta actividad, se denominan HAC. Para aquellos suelos minerales

que no quedan incluidos en ninguno de estos tipos, se incluye otra categoría: Otros suelos minerales.

El proceso de homologación se realiza para cada uno de los suelos de las diferentes unidades cartográficas de suelos. Esta propuesta puede aplicarse para todos los suelos de condiciones hidromórficas del país. Para los demás suelos, se estima incluir otras categorías (como páramos y zonas áridas). De ser necesario, considerar otras condiciones necesarias para complementar la propuesta de homologación.

Consideraciones para la regionalización de los ecosistemas acuáticos a partir de comunidades hidrobiológicas

La regionalización de los ambientes acuáticos se ha basado principalmente en aspectos geográficos, geológicos, geomorfológicos, climáticos o de

la química y física del agua (Arriaga-Cabrera *et al.*, 2000), lo cual se debe a que los factores abióticos son relativamente más sencillos de evaluar. Las

características biológicas de una región, en cambio, son muy variables y están sometidas a diversos factores de cambio, tanto naturales como antrópicos, lo que hace más difícil la interpretación y el uso de los organismos como elementos de regionalización. No obstante, para los ecosistemas acuáticos, es posible considerar la utilización de algunos grupos biológicos que puedan ayudar a definir distintas regiones limnológicas, como es el caso de la comunidad de peces.

Cuando se combinan los componentes biológicos y los hidrográficos, se obtiene una visión más integral del territorio, ya que de esta manera se expresa la historia natural de los organismos. Probablemente, esto es más aplicable a algunos grupos taxonómicos que se distribuyen en las regiones siguiendo un patrón metacomunitario de clasificación de especies (*species sorting*), de acuerdo al filtrado que les imponen las condiciones ambientales (Leibold *et al.*, 2004; Holyoak *et al.*, 2005). Otros grupos presentan dinámicas metacomunitarias de dispersión en masa, de neutralidad o de dinámica de parches (*patch dynamics*); en la primera, las especies se distribuyen regionalmente siguiendo procesos de movimientos masivos de organismos; en la segunda, las especies presentan cierta independencia de la influencia de los factores ambientales y, en la tercera, las especies interactúan en los parches del paisaje regional, pero no con los gradientes ambientales (Leibold *et al.*, 2004; Holyoak *et al.*, 2005). En estos tres últimos casos (dispersión en masa, neutralidad y dinámica de parches), la regionalización biótica puede ser más difícil de realizar y de interpretar.

El tamaño corporal influye en la estructura de las metacomunidades acuáticas y su respuesta a los cambios ambientales. Del conjunto de organismos con dispersión pasiva, las comunidades con individuos de tallas grandes responden mejor a las variaciones espaciales, lo que demuestra una mayor limitación a la dispersión con el aumento del tamaño corporal (De Bie *et al.*, 2012). Las metacomunidades de organismos con dispersión activa (como los insectos) tienen una distribución menos limita-

da que los dispersores pasivos con un tamaño similar. En cambio, la dispersión de los vertebrados (peces y anfibios) está relacionada con los patrones de conectividad local. Así, el tamaño corporal y el modo de dispersión son factores importantes para definir la estructura metacomunitaria y, por lo tanto, es necesario tenerlos en cuenta al utilizarlos para regionalizar los sistemas acuáticos. Algunos de los grupos más utilizados o con mayor potencial de uso para los procesos de regionalización son los peces, los macroinvertebrados y las algas.

Para utilizar la biota acuática en procesos de regionalización de los cuerpos de agua colombianos, se sugiere considerar los siguientes aspectos:

- Se requieren bases de datos suficientemente robustas sobre la taxonomía de los organismos en las diferentes regiones del país. Esto implica la prospección biológica de un gran número de cuerpos de agua (lénticos, lóticos, transicionales, costeros y marinos) y la formación de expertos en taxonomía de las diferentes comunidades hidrobiológicas.
- Es necesario organizar redes de investigadores en los diferentes grupos de organismos que compartan información, experiencias, metodologías y conocimientos sobre la composición biótica de las distintas regiones.
- Es importante fortalecer el SiB Colombia como herramienta fundamental para compartir datos taxonómicos validados y generar rutas de articulación entre diferentes sistemas nacionales que puedan aportar información relevante para el proceso.
- El esfuerzo taxonómico debe profundizarse preferiblemente hasta el nivel de especie, ya que niveles como géneros, familias, clases, etc., aportan menos información sobre la composición biótica de las regiones.
- Deben estudiarse y tenerse en cuenta los patrones metacomunitarios a los cuales res-

ponden los diferentes grupos de organismos acuáticos. Así, algunos grupos de algas, por ejemplo, tienden a ser más cosmopolitas y a presentar dispersión masiva, y con ello tener menos poder de separación regional que los peces o los macroinvertebrados. Estos están

más asociados a variaciones de conectividad local. Se requiere más información de estos patrones para definir mejor el papel de las comunidades hidrobiológicas en la regionalización acuática del país.

Hoja de ruta para la generación de índices a partir de las comunidades hidrobiológicas, teniendo en cuenta la regionalización y su relación con otros componentes de los ecosistemas acuáticos

La delimitación por regiones constituye una herramienta para identificar y entender la dinámica de los elementos que definen un territorio y, en consecuencia, permite gestionar su uso y conservación. El desafío no solo está en su delimitación, sino en comprender los mecanismos e interacciones que ocurren en sus diferentes niveles de constitución (microhábitat a cuenca hidrográfica), a la luz de la intervención antrópica (Mesa *et al.*, 2016). En términos prácticos, la regionalización ofrece una visión simplificada del territorio para la toma de decisiones y, representa la ruta para una mejor ordenación territorial y una óptima gestión del recurso hídrico. Se incluye la definición de áreas protegidas, con base en criterios ecológicos y del desarrollo humano (McMahon *et al.*, 2004).

Para los ecosistemas acuáticos, las ecorregiones están definidas como áreas de gran extensión que contienen un conjunto de ecosistemas, en los que a su vez se alberga una flora y fauna determinadas (Abell *et al.*, 2008). Con base en lo anterior, se hace necesario trazar el camino para evaluar, en estos niveles espaciales, el estado de los ecosistemas por medio de indicadores biológicos.

Si la unidad de estudio corresponde al conjunto de sistemas que contiene una región, la evaluación de la diversidad será la suma de la diversidad Beta entre ecosistemas, la cual corresponde entonces a la diversidad *Gamma* (Magurran, 2008). Esta es una medida adecuada para evaluar los ecosistemas acuáticos y sus cuencas hidrográficas, ya que son

sistemas abiertos y dinámicos con características biofísicas determinadas que, además, son transversales a gran parte del territorio, lo que supone una mayor área y una elevada diversidad (Arita y Rodríguez, 2001; Mesa *et al.*, 2016).

La respuesta en este caso puede tener dos escenarios de acción. El primero y el más recomendado, es abordar la regionalización de los indicadores desde una base conocida o definida, como es el caso del ejercicio realizado para peces (Mesa *et al.*, 2016), en el cual se usan los patrones ecológicos representativos y los aspectos biogeográficos de estos organismos (distribución actual y potencial de las especies y parámetros hidrogeográficos) como criterios de diferenciación. La segunda posibilidad, cuando en el escenario de partida no hay información suficiente acerca de los posibles patrones de regionalización de los grupos bióticos, es abordar el proceso de manera inversa; es decir, plantear un conjunto de atributos generales de las comunidades para seleccionar indicadores que permitan reconocer, a través de diversos análisis y de las respuestas obtenidas, los factores asociados con la distribución de las especies, a la luz de las características regionales particulares.

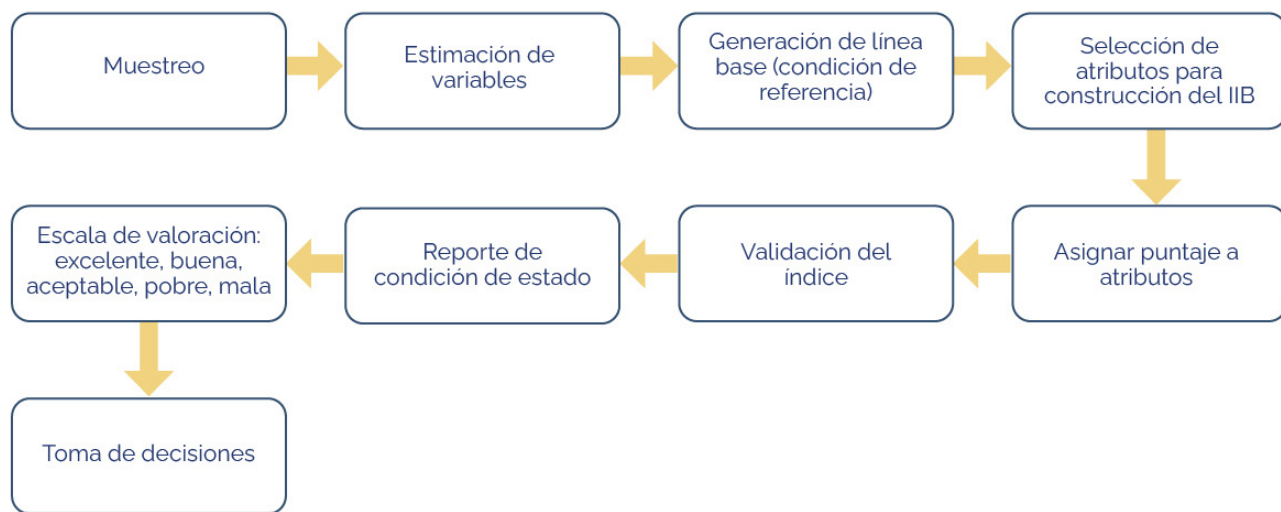
A continuación, se presentan los pasos generales para evaluar el estado ecosistémico con base en datos de la biota acuática, específicamente mediante el uso de indicadores ecológicos concretados en los Índices de Integridad Biótica (IIB), en el marco del Promsea.

Los Índices de Integridad Biológica (IIB)

La construcción y formulación de índices multi-métricos, como los IIB, se basan en supuestos y evidencias que exponen la interacción entre la actividad humana y los atributos biológicos de un ecosistema dado, los cuales se obtienen a través

del monitoreo y el análisis espacio-temporal de dicha interacción (Frey, 1977; Córdoba-Ávalos *et al.*, 2009). Su proceso de diseño e interpretación, de manera global, sigue las fases que se presentan en la Figura 64.

Figura 64. Proceso general de diseño de los indicadores, a partir de las comunidades hidrobiológicas



Fuente: Modificado desde Ruaro *et al.* (2020).

A continuación, se detallan cada una de las fases en el marco del concepto de la regionalización.

Muestreo

Toma de datos:

La sensibilidad y robustez del índice que se proponga guarda relación directa con el diseño establecido para el muestreo y, de manera específica, con la periodicidad, el esfuerzo y el tamaño de la muestra (Ruaro y Gubiani, 2013). En términos generales, se deben incluir como mínimo dos periodos hidrológicos o climáticos contrastantes; no obs-

tante, aspectos como los ciclos de vida de los organismos determinarán la frecuencia de su muestreo (Casatti *et al.*, 2009). Así, los muestreos para el monitoreo de los peces suelen hacerse en dos a cuatro momentos de un año, a fin de que cubran un ciclo hidrológico completo; mientras que, para el plancton, constituido por organismos de vida

corta, sus respuestas pueden medirse de manera mensual e incluso semanal, si se busca identificar cambios a una menor escala de tiempo y espacio (Pinilla, 2016).

La naturaleza de los ecosistemas también es fundamental en el diseño del muestreo. Ecosistemas de tipo lótico, demandarán el reconocimiento de las dinámicas que ocurren a lo largo de toda la cuenca (concepto del río como un continuo) y su relación con las variables ambientales (principalmente coberturas vegetales ribereñas) (Cuéllar *et al.*, 2018). En ecosistemas de tipo léntico y transicional, por su parte, podrían ser más relevantes as-

pectos como la geomorfología del cuerpo de agua, la profundidad y la altitud. El diseño del muestreo debe articularse con los métodos y técnicas de captura, pues de su estandarización dependerá la comparabilidad y representatividad de los datos. Para el caso de los peces, tanto de ambientes dulceacuícolas como marinos, es necesario desarrollar esfuerzos para definir estandarizaciones que vayan más allá del uso de redes de un ojo de malla específico, y que integren tanto el tiempo como el área de muestreo (Ferreira y Casatti, 2006). Similares esfuerzos se requieren para las demás comunidades acuáticas.

Estimación de variables

Análisis de datos:

Una vez obtenidos los datos primarios, el análisis de esta información tiene dos niveles de evaluación. En el primero, considerado para las primeras etapas de implementación del protocolo, cada grupo biótico ha de tenerse en cuenta de manera independiente (por ejemplo, análisis de diversidad ecológica alfa y beta), y cada atributo ser analizado por separado (no dentro de un IIB) para establecer su relación con los parámetros físicos y químicos y con los valores del Índice de Calidad Ambiental (ICA) (datos hidrobiológicos vs datos calidad del agua).

Posteriormente, en etapas más avanzadas de implementación del protocolo, se podrá evaluar la integración de los diferentes atributos, a través de uno o varios índices multimétricos, con el objeto de estructurar una evaluación robusta del estado de los ecosistemas, que dé cuenta de la alta complejidad ecológica de los ambientes acuáticos (Karr, 1981; Angermeier y Karr, 1986).

Línea base (condición de referencia)

Si se piensa en la gran cantidad de información ambiental que genera el país, se podría inferir que ya se cuenta con lo necesario para realizar informes del estado de los ecosistemas acuáticos; sin embargo, hay dos grandes obstáculos para desarrollar esos productos. El primero es que son escasas las zonas donde este proceso obedece a un monitoreo continuo con todo lo que esto implica:

muestreo mínimo dos veces al año en una matriz integral (suelos, agua, biota, comunidades). El segundo es que ya no existen ecosistemas que encajen con la definición de condición de referencia, para análisis comparativos, debido a que todas las áreas hidrográficas del país presentan un grado considerable de intervención antrópica.



Por esta razón, el protocolo en su primera versión tienen como meta final el generar lineamientos para el establecimiento de líneas base de monitoreo integral que obedezcan a un proceso de monitoreo continuo en el corto, mediano y largo plazo, bajo estándares de validación de calidad de la información concertados, a partir de múltiples mesas de trabajo interinstitucional, que generen procesos

de interoperabilidad entre los SIAC con el fin de que esta información esté disponible para los tomadores de decisiones y se pueda hacer una mejor gestión de los ecosistemas acuáticos del país. Como ejemplo de ese proceso, a continuación, se presentan los pasos para llegar a la construcción de indicadores a partir del establecimiento de líneas base de biodiversidad.

Selección de atributos para construcción del IIB

El principio para seleccionar los atributos que harán parte de los índices bióticos (unimétricos o multimétricos) responde, principalmente, a que estos deben reflejar, específicamente y de manera predictiva, las respuestas a las perturbaciones ambientales de los grupos biológicos evaluados, incluyendo efectos singulares y acumulativos. Además, deben ser comparables entre regiones, al ser parámetros ecológicos de la comunidad. Los atributos incluidos y combinados deben reflejar la amplia diversidad ecológica que se presenta en los diferentes niveles de organización ecológica.

En general, los atributos registrados en la literatura abarcan aspectos de composición y riqueza, densidad y biomasa, distribución y origen de las especies, estructura trófica, condiciones de tolerancia de los individuos ante la calidad del hábitat y rasgos morfofuncionales (por ejemplo, posición de la boca en peces o, formas y tallas para el plancton) (Ruaro y Gubiani, 2013; Casatti *et al.*, 2009; Ferreira y Casatti, 2006; Harris, 1995; Lyons *et al.*, 1995). Para la constitución de un índice de integridad biótica deben incluirse, al menos, nueve atributos, los cuales, en conjunto, deben dar un panorama general de la integridad biológica de la comunidad y, por



tanto, de la salud del ecosistema (Karr, 1981). De ahí la importancia de incluir variables que reflejen tanto la composición, como la estructura y función, en el marco de las posibles alteraciones ambientales que se busca identificar.

Además, se debe tener en cuenta la naturaleza de los atributos propuestos; es decir, si son datos de

tipo cuantitativo (riqueza, abundancia y densidad), o si son de tipo cualitativo (rasgos morfofuncionales). Las variables de tipo cuantitativo pueden presentar una mayor varianza y una sobreestimación de su representatividad para el índice si no hay homogeneidad de unidades, lo que puede generar sesgos interpretativos (Zhao *et al.*, 2019).

Construcción de índices multimétricos

El proceso de diseño e implementación de los índices de integridad biótica debe responder a una pregunta de investigación, a un objetivo de indicación y, desde esta base, debe permitir elegir los atributos más apropiados (ver Figura 65). Esto implica que, aunque el IIB permite explorar el efecto ocasionado por múltiples factores de estrés ambiental (Karr, 1981; Lyons *et al.*, 1995), es necesario tener claridad sobre qué se pretende bioindicar, pues la pérdida de integridad biótica no solo responde a la contaminación reciente o la degrada-

ción física; también puede responder a aspectos como la historia del uso de la tierra, la contaminación química acumulada o la introducción de especies exóticas invasoras. Estos factores acumulativos pueden enmascarar procesos ecológicos que ocurren actualmente (Angermeier y Karr., 1986; Casatti *et al.*, 2009). Para el caso del protocolo, el objetivo principal recae en la generación de estos índices en relación con los principales fenómenos de transformación priorizados (carga contaminante, fragmentación y cambio climático).

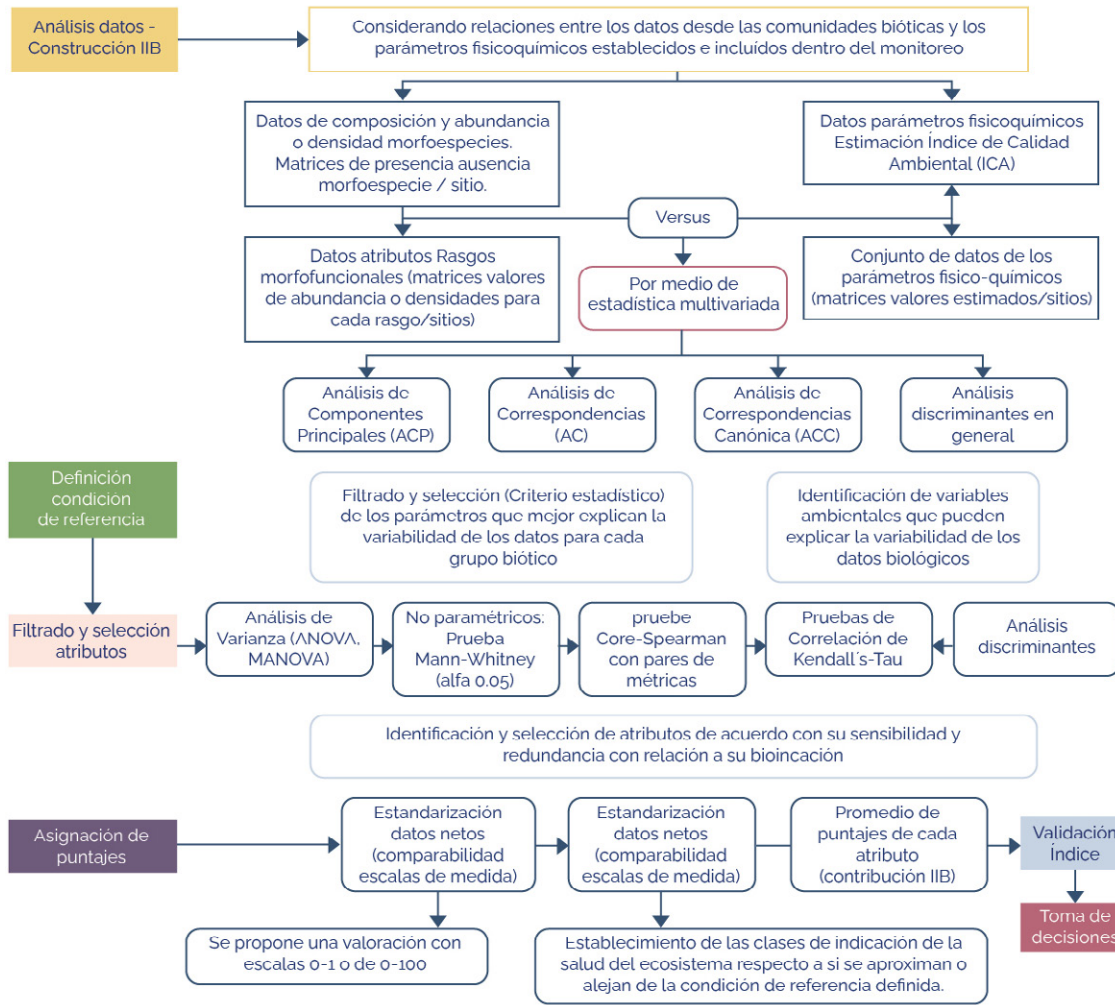
Figura 65. Proceso de diseño de los índices de integridad biótica



A continuación, se detallan las fases clave del proceso indicado en la Figura 65:

- Generación de línea base (condición de referencia): se parte de la selección de variables y atributos que, a partir de su monitoreo, brinden la información suficiente para describir la situación actual del ecosistema. Es importante que esta información sea levantada de forma continua, para que se puedan hacer análisis comparativos.
 - Selección de atributos y su puntuación: Posterior a listar, de manera general, el conjunto de posibles atributos que permitirán evaluar, de manera integral, el estado de los ecosistemas a nivel regional, se requiere medir la sensibilidad y redundancia de cada uno de estos. Se consideran como sensibles aquellos que revelen, de manera discriminativa y clara, cambios en la calidad del agua y del hábitat, por efecto de la ocupación e interferencia humana (Angermeier y Karr, 1986; Lyons *et al.*, 1995). Después del proceso de selección, los resultados de los atributos deben puntuarse en una escala común para combinarse en un IBI final (Stoddard *et al.*, 2008).
 - Adicionalmente, se debe tener en cuenta que algunos atributos pueden incrementar directamente la interpretación en los niveles de disturbio; estos deberán ser reajustados en sus escalas y sus valores sustraídos del máximo valor potencial (esperado del índice) (McCormick *et al.*, 2001). Los puntajes de los atributos son sumados y divididos por el número final de atributos incluidos para producir un único puntaje.
 - Validación y calibración del índice: la última fase en la constitución de un índice de integridad biótica (ya sea de un grupo biótico o integrando algunos de estos), corresponde a la validación y calibración de los datos; es decir, a la evaluación constante (a lo largo de un monitoreo y en diferentes periodos hidrológicos) de la sensibilidad del índice para su ajuste o re-diseño, considerando que los ecosistemas son dinámicos e interactúan con una matriz ambiental y son influenciados por la intervención humana (cambio climático, introducción de especies exóticas, contaminación; entre otros).
- De esta manera, el índice propuesto deberá reflejar el estado del ecosistema, independiente de su temporalidad o periodicidad (Casatti *et al.*, 2009; Moya *et al.*, 2007). El método para evaluar la sensibilidad y robustez del índice diseñado consiste en prueba y error, lo que significa la repetición sistemática en la toma de datos en diferentes niveles espaciales y temporales, con el objeto de ser comparados con la condición de referencia y las condiciones de calidad del agua efectivas de los sitios de muestreo (Ruaro *et al.*, 2020). El esquema general de la construcción de índices, a partir de los grupos bióticos, se presenta de manera detallada en la Figura 66.

Figura 66. Proceso metodológico general para el análisis de los atributos seleccionados y los parámetros fisicoquímicos para la construcción de IIB



Este proceso de búsqueda y análisis de la información contenida en los distintos sistemas es un punto de partida para comprender la estructura de la información ambiental del país, permitiendo evaluar su organización, calidad, periodicidad, actores responsables de la toma y el reporte, así como los procesos de estandarización e interoperabilidad. El SIAC, liderado por el Ideam, está estructurado en torno a cuatro componentes principales que abarcan los recursos naturales renovables: agua, biodiversidad, suelo y aire. Bajo estos ejes funcionan diversos subsistemas que consolidan la información ambiental del país.

Como parte del ejercicio de priorización de variables e indicadores del Promsea, se llevó a cabo una revisión detallada de estos subsistemas con el fin de identificar cómo la información generada en el proceso de implementación del protocolo podría integrarse en el SIAC. En este sentido, se plantea la necesidad de que los datos recopilados puedan ser incorporados dentro de los componentes existentes, organizados bajo las siguientes agrupaciones temáticas: uso del agua, monitoreo de la calidad del recurso hídrico, caracterización de fuentes hídricas y monitoreo ambiental a partir de indicadores ambientales.



Canal del Dique - Caño Correa. María la Baja - Bolívar



Adopción de protocolos y metodologías para el monitoreo y seguimiento

Los procesos de generación de información sobre los ecosistemas del país y sus componentes integradores han evolucionado de manera dinámica y descentralizada. Como resultado, existe una gran heterogeneidad en los instructivos, guías, manuales y protocolos, los cuales han sido desarrollados bajo distintos enfoques (académicos, sectoriales, públicos, privados y tecnológicos, entre otros) y, generalmente, responden a necesidades específicas de proyectos o procesos puntuales.

Debido a esta diversidad metodológica, es importante avanzar en la homogeneización y estandarización de la generación de información de las

variables, comunidades, indicadores e índices mínimos priorizados en los procesos de monitoreo y seguimiento del estado de los ecosistemas a escala nacional. En particular, para los ecosistemas acuáticos, resulta esencial reconocer, integrar y adoptar documentos y herramientas oficiales que ya contienen metodologías, métodos y lineamientos técnicos y científicos definidos, garantizando así la coherencia y comparabilidad de los datos generados. Por ello, en el presente capítulo se presentan los protocolos, guías, instructivos, procedimientos y lineamientos adoptados, los cuales están asociados a los pasos y fases del monitoreo y seguimiento propuestos en el Promsea (ver Tabla 60).

Tabla 60. Protocolos y guías (adoptados y en proceso de adaptación) para el sistema de monitoreo de los ecosistemas acuáticos del país

Componente/Comunidad	Protocolo o guía oficial adoptado
Calidad del agua	<p>• Marino costero:</p> <p>Vivas-Aguas, L. J. y S. M. Navarrete-Ramírez. (2014). Protocolo Indicador Calidad de Agua (ICAMPFF). <i>Indicadores de monitoreo biológico del Subsistema de Áreas Marinas Protegidas (SAMP)</i>. Invemar, GEF y PNUD. Serie de Publicaciones Generales del Invemar No. 69, p. 32</p> <p>http://www.invemar.org.co/documents/10182/14479/04+ProtocoloIndicadorCalidaddeAguadigital.pdf/c16bd915-0b24-446b-9fe0-dbbc239111dd</p> <p>• Continental:</p> <p>Ideam. (2018c). <i>Protocolo de monitoreo del agua</i>.</p> <p>http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023773/PROTOCOLO_MONITOREO_AGUA_IDEAM.pdf</p> <p>Ideam. (2019a). <i>Estudio Nacional del Agua – ENA</i>.</p> <p>http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023858/ENA_2018.pdf</p>

Comunidades hidrobiológicas

• **Pastos marinos:**

Gómez-López, D. I., S. M. Navarrete Ramírez, R. Navas-Camacho, C. M. Díaz-Sánchez, L. Muñoz-Escobar y E. Galeano. (2014). Protocolo Indicador Condición Tendencia Praderas de Pastos Marinos (ICTPM). *Indicadores de monitoreo biológico del Subsistema de Áreas Marinas Protegidas (SAMP)*. Invemar, GEF y PNUD. Serie de Publicaciones Generales del Invemar No. 68, p. 36

<http://www.invemar.org.co/documents/10182/14479/02+ProtocoloIndicadorPastosMarinosdigital.pdf/1686f1fe-4669-40bf-ab25-5468d656ad73>

• **Corales:**

Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andréis [Invemar]. (1994–2011). Índice de integridad ecológica para corales (IIEC). Sistema de Información Ambiental Marina de Colombia (SIAM). <https://siam.invemar.org.co>.

Rodríguez-Rincón, A. M., S. M. Navarrete-Ramírez, D. I. Gómez-López y R. Navas-Camacho. (2014). Protocolo Indicador Condición Tendencia Áreas Coralinas (ICTAC). *Indicadores de monitoreo biológico del Subsistema de Áreas Marinas Protegidas (SAMP)*. Invemar, GEF y PNUD. Serie de Publicaciones Generales del Invemar No. 66, p. 52.

<http://www.invemar.org.co/documents/10182/14479/01+ProtocoloIndicadorAreasCoralinasdigital.pdf/2cbba4fe-dc3e-423a-b2f1-e191ee42deed>

• **Manglares:**

Navarrete-Ramírez, S. M., A. M. Rodríguez-Rincón. (2014b). Protocolo Indicador Condición Tendencia Bosques de Manglar (ICTBM). *Indicadores de monitoreo biológico del Subsistema de Áreas Marinas Protegidas (SAMP)*. Invemar, GEF y PNUD. Serie de Publicaciones Generales del Invemar No. 67, p. 40

<http://www.invemar.org.co/documents/10182/14479/03+ProtocoloIndicadorBosquesdeManglardigital.pdf/215dd659-4cc6-49f4-8771-2c58ae-5f18cf>

• **Recurso pesquero:**

Rueda, M., D. Bustos-Montes, E. Vilorio y S. M. Navarrete-Ramírez. (2014). Protocolo Indicador Uso de recursos hidrobiológicos. *Indicadores de monitoreo biológico del SAMP*. Invemar, GEF y PNUD. Serie de Publicaciones Generales del Invemar No. 72, p. 40

	<p>http://www.invemar.org.co/documents/10182/14479/06+ProtocoloIndicadorUsoRecursosHidrobiol%C3%B3gicosdigital.pdf/f640c715-de42-4e8f-8fb1-0a769389aa0e</p> <p>• Comunidades continentales:</p> <p>Pinilla, G. (2017). <i>Prácticas de limnología: guías de laboratorio y campo</i>. Facultad de Ciencias, Departamento de Biología. Universidad Nacional de Colombia. 1ra. Edición.</p> <p>https://www.uneditorial.com/practicas-de-limnologia-guias-de-laboratorio-y-campo-ecologia-y-medio-ambiente.html</p>
Geomorfología	<p>• Marino costero:</p> <p>Navarrete-Ramírez, S. M. (2014). Protocolo Indicador Variación línea de costa: perfiles de playa. <i>Indicadores de monitoreo biológico del Subsistema de Áreas Marinas Protegidas (SAMP)</i>. Invemar, GEF y PNUD. Serie de Publicaciones Generales del Invemar No. 73, p. 36</p> <p>http://www.invemar.org.co/documents/10182/14479/08+ProtocoloIndicadorL%C3%ADneadeCosta.pdf/c173d0ec-9a4e-442c-892d-f7fa5df41bf8</p> <p>• Continental:</p> <p>Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2018) <i>Hoja metodológica del indicador Cambio de Superficie Glaciar</i> (Versión 1.00).</p> <p>http://www.ideam.gov.co/documents/24155/123679/41-4.19_HM_Cambio_superficie_glaciar_3_FI.pdf/ee30441d-1f35-4c67-8aaa-1269e48c4295</p> <p>Ideam. (2021b). <i>Metodología de la operación estadística Balance de masa glaciar</i>. Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental.</p> <p>http://www.ideam.gov.co/documents/11769/116508509/M-GCI-M02g+METODOLOG%C3%8DA+DE+LA+OPERACI%C3%93N+ESTAD%C3%8DSTICA+BALANCE+DE+MASA+GLACIAR.pdf/7165aaff-ae72-486c-8c38-dc04c8dd6b4c</p> <p>Roberson, K. Jaramillo, O. Castiblanco, M. (2013). <i>Guía metodológica para la elaboración de mapas de geomorfología a escala 1 : 100.000</i>. Ideam.</p> <p>http://www.ideam.gov.co/documents/11769/152722/Guia_Enero_201401+%281%29.pdf/501aa421-a0e4-4a1d-a5c8-d6cb1b0de520</p>

Suelos*	<ul style="list-style-type: none"> • Erosión: Ideam, MADS, UDCA. (2015). <i>Protocolo para la identificación y Evaluación de la Degradación de Suelos por Erosión.</i> http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023647/023647.html • Salinización: Ideam, CAR, UDCA. (2017d). <i>Protocolo para la identificación y Evaluación de la Degradación de Suelos por Salinización.</i> http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023685/023685.html • Desertificación: Ideam. (2019b). <i>Protocolo para la identificación y Evaluación de la Degradación de Suelos por Desertificación.</i> http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023872/023872.html • Cartografía y laboratorios: Igac. (2006). <i>Métodos analíticos del Laboratorio de Suelos</i> (análogo). https://www.igac.gov.co/es/catalogo/metodos-analiticos-del-laboratorio-de-suelos Igac. (2014). <i>Mapa de suelos Colombia. Geopedología</i> (Digital).
Cobertura	<ul style="list-style-type: none"> • Vegetación: Ideam. (2010a). <i>Leyenda nacional de coberturas Corine Land Cover a escala 1 : 100.000.</i> http://www.ideam.gov.co/documents/11769/222663/E_ECCMC_Ver21_100K.pdf/addc175f-3ac6-415b-9b9e-a1c4368b5b3e Ideam. (2016a). <i>Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal - Escala 1:100.000.</i> http://www.ideam.gov.co/documents/13257/14369/PROTOCOLO+INCENDIOS+4Oct.pdf

	<p>• Delimitación superficie del agua:</p> <p>Acharya <i>et al.</i> (2019). <i>Application of Water Indices in Surface Water Change Detection Using Landsat Imagery in Nepal.</i></p> <p>https://www.researchgate.net/publication/333147142_Application_of_Water_Indices_in_Surface_Water_Change_Detection_Using_Landsat_Imagery_in_Nepal</p> <p>McFeeters. (2007). <i>The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features.</i></p> <p>https://doi.org/10.1080/01431169608948714</p>
<p>Procesos estadísticos</p>	<p>• Metodologías:</p> <p>Gómez Delgado y Barredo. (2005). <i>Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la ordenación del territorio.</i></p> <p>https://www.researchgate.net/publication/31772457_Sistemas_de_informacion_geografica_y_evaluacion_multicriterio_en_la_ordenacion_del_territorio_segunda_edicion</p> <p>Comisión Nacional de Actividades Espaciales (Argentina) – CONAE. (2016). Índices espectrales derivados de imágenes satelitales Landsat 8 Sensor OLI.</p> <p>https://catalogos.conae.gov.ar/landsat8/Docs/IndicesEspectralesDerivadosDeLandsat8.pdf</p> <p>Jabbar <i>et al.</i> (2019). <i>Proceso Analítico Jerárquico para la evaluación de susceptibilidad de cuencas.</i></p> <p>https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11356-019-06355-9.pdf</p> <p>Marcano <i>et al.</i> (2015). <i>Estimación de pesos ponderados de variables para generar mapas de susceptibilidad a movimientos en masa a través de la Evaluación Espacial Multicriterio.</i></p> <p>http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S1012-70892015000200004&script=sci_abstract</p> <p>Xu. (2006). <i>Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery.</i></p> <p>https://doi.org/10.1080/01431160600589179</p>

Insumos cartográficos	<p>Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt [Instituto Humboldt]. (2014). Marco conceptual y metodológico para la construcción del mapa de humedales de Colombia a escala 1:100.000. Instituto Humboldt.</p> <p>http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/9519</p> <p>Ideam. (2017). <i>Mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos, escala 1 : 100.000.</i></p> <p>http://www.ideam.gov.co/documents/11769/222663/E_ECCMC_Ver21_100K.pdf/addc175f-3ac6-415b-9b9e-a1c4368b5b3e</p> <p>Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (Instituto Humboldt), Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés (Invemar) e Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Igac). (2020). <i>Memoria técnica. Mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia (MEC), escala 1 :1 00.000.</i> p. 170</p> <p>http://www.andi.com.co/Uploads/MapaEcosistemas2017.pdf</p>
-----------------------	--

En suelos se espera tener un ajuste para el monitoreo en el marco de la estimación de GEI que incluye la metodología para la homologación de suelos del sistema taxonómico USDA al sistema de clasificación IPCC modificado para Colombia, desarrollado por el Equipo AFOLU Alta Montaña; sin embargo, aunque se desarrollará la metodología para Alta Montaña, se requerirá el ajuste correspondiente para llevarlo a escala nacional para toda el área continental y costera.

En cuanto al mapa de suelos existen dos documentos en publicación del Igac, que acá no se in-

cluyen por no estar oficialmente publicados, pero se espera tener versión oficial próximamente:

- Mapa de Correlación de Suelos: Corresponde a la nueva versión del Mapa de Geopedología al que se le realizan ajustes de algunos departamentos y de la base de datos.
- Estudio y Mapa de Suelos Hidromórficos: Presenta la metodología para identificar suelos de condiciones de humedad, el cual será un referente valioso para la identificación de ecosistemas acuáticos temporales.



CAÑO CORREA. CANAL DEL DIQUE MARÍA LA BAJA - BOLIVAR



Salvedades y recomendaciones para el uso del Promsea

El Promsea no es de obligatorio cumplimiento. Se trata de una herramienta puesta a disposición del país con directrices de libre uso, diseñada para ser dinámica, adaptable y en constante mejora. Su construcción se enmarca dentro de las misionariedades del Ideam, lo que hizo indispensable una evaluación interna continua para identificar los procesos y la información que se generan en el monitoreo de ecosistemas acuáticos, así como las oportunidades de mejora. Por ello, se establecieron espacios de articulación interinstitucional, integrando proyectos que contribuyen a esta meta institucional.

La creación de esta herramienta respondió a una necesidad real: evaluar el estado de los ecosistemas acuáticos, más allá de un enfoque centrado únicamente en los recursos hídricos. Además, su desarrollo se fundamentó en una premisa costo-eficiente, que optimiza los esfuerzos existentes y fortalece la gestión ambiental en Colombia.

Como resultado de la implementación del Promsea, se espera avanzar en la construcción de líneas base a mediano plazo, que garanticen la calidad y continuidad de la información utilizada en la evaluación del estado de los ecosistemas acuáticos. En este contexto, y considerando los conceptos, resultados y aportes recopilados a lo largo del desarrollo del mismo, a continuación, se presentan las principales recomendaciones para su actualización y fortalecimiento continuo como herramienta técnico-operativa:

- Para lograr que el monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos responda a las características de cada área del territorio nacional, es necesario surtir un proceso de regionalización, mediante el cual sea posible distinguir claramente los ecosistemas. Para ello, se deben considerar insumos geográficos, que permitan trabajar a diferentes escalas espaciales.

- Debido a la necesidad de que el monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos sea continuo, y en todo el territorio, se deben incluir como mínimos nacionales, variables e indicadores que garanticen que este proceso sea realizable por todas las entidades e instituciones responsables, en términos de costos, eficiencia y oportunidad. En este sentido, es necesaria, además, la destinación de recursos del estado y la vinculación de diferentes sectores, para apoyar la sostenibilidad del monitoreo y la gestión adecuada de los ecosistemas.

- Entre las mayores limitaciones técnicas identificadas para el monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos, en el país, cabe mencionar la falta de metodologías y procesos estandarizados y, la poca claridad normativa en relación con la batería de variables, los rangos de las variables medidas y forma de presentación de la información. Por esta razón, es necesario contar con metodologías estandarizadas y ajustes normativos para el monitoreo de los ecosistemas, en consideración al proceso de regionalización. Además, es indispensable que los análisis sean realizados por profesionales competentes y calificados para cada componente.

- Asimismo, se evidenciaron falencias en cuanto a la disponibilidad de la información, la capacitación del personal que realiza los muestreos y análisis y el poco apoyo institucional. Al respecto, se destacó la necesidad de actualizar periódicamente la información en el SIAC, realizar capacitaciones constantes en cuanto a la obtención, procesamiento, análisis, validación y disposición de la información y, la necesidad de tener mayor disposición para el trabajo cooperativo, multidisciplinario e interinstitucional.

A continuación, se presentan las necesidades, salvedades y limitaciones que desde cada componente han sido identificadas:

Componente físico

Geomorfología y suelos

- Se hace necesario profundizar en el tema de morfodinámica y su aplicación en el marco del Promsea. Para esto sería pertinente realizar un taller interinstitucional y de expertos, para abordar las dinámicas y los procesos geomorfológicos, con el fin de definir variables a monitorear, así como las competencias y la realidad sobre la generación de esta información a nivel nacional y regional. En este taller se debe analizar qué tipos de dinámicas evaluar y el alcance: glaciar, marina, fluvial, lacustre, gravitacional y antrópica, entre otras.
- El Igac realiza un ajuste al Mapa de Suelos de Colombia, a escala 1 : 1 00.000, que, paralelo a este documento, está en proceso de edición. Una vez se disponga de este mapa con sus correspondientes ajustes, se sugiere actualizar el Mapa de Ecosistemas Continentales, Costeros y Marinos de Colombia, pues será este en el que se integren los atributos como unidades cartográficas de suelo y tipos de relieve, utilizados para la homologación de suelos a la propuesta de ajuste del IPCC y para la zonificación de unidades de monitoreo.
- Se sugiere el uso del mapa de suelos hidromórficos del país, realizado por el Igac, como base para la zonificación de ecosistemas acuáticos. Al momento de la entrega de este documento, el mapa se encontraba en proceso de publicación. Cuando se encuentre disponible será necesario profundizar en la metodología y analizar su alcance y utilidad para el uso propuesto.
- Se considera pertinente revisar la posibilidad de integrar la metodología planteada para la homologación de suelos a las propuestas realizadas en el marco de proyectos liderados por otros grupos de trabajo del Instituto, así como complementar la metodología nacional en relación con esta temática.
- Para los muestreos de campo será necesario generar manuales de campo, orientados a suelos de ecosistemas acuáticos, así como la definición de formatos de información tomada en campo y de materiales y equipos necesarios.
- Colombia dispone de algunos mapas como el de carbono orgánico del suelo), potencial de secuestro de carbono y suelos afectados por sales elaborados con metodologías globales de la FAO y Alianza Mundial por los Suelos (GSP), que han sido generados mediante modelos de información secundaria. Estos mapas pueden ser utilizados como referencias, pero no directamente como datos ya que son el resultado de modelamiento y ecuaciones de pedotransferencias. Adicionalmente, es importante resaltar que Colombia dispone de información más precisa y detallada que la utilizada para estos modelos, tomada de fuentes que manejan información global.
- En cuanto a las variables clave, identificadas para evaluar el suelo de ecosistemas acuáticos transicionales, es importante que, para el caso de la infestación, se considere la aparición de especies vegetales invasoras, como el retamo espinoso (*Ulex europaeus*) y otras, según el ecosistema.

Sistemas de Información Geográfica

Existe la necesidad de continuar con el apoyo interinstitucional, mediante la creación de convenios con las diferentes entidades del SINA y entidades productoras de información geográfica, para el intercambio de información oficial de tipo conceptual, metodológico y geográfico, que sea reciente y actualizada. Así mismo, se identificó que las diferentes entidades productoras de información geográfica realizan sus procesos de forma aislada, lo cual genera análisis sesgados, sin que exista interoperabilidad de los datos; esto también genera duplicidad de esfuerzos y de información geográfica.

De otro lado, se evidencia la necesidad de tener un constante proceso de capacitación y actualización, por medio de la realización de talleres nacionales y regionales, para tener un acercamiento y trabajo participativo con las diferentes instituciones y entidades que aportan sus conocimientos y experiencias y que pueden fortalecer la etapa futura de implementación del Promsea. Para esto, ya se tiene el avance alcanzado en el año 2019, con la realización de talleres participativos, a partir de los cuales se hizo el levantamiento de información de las iniciativas de monitoreo que tienen en cuenta las variables hidrobiológicas, físicas y socioeconómicas, y que fue registrada en los mapas parlantes generados.

Con esos datos se realizaron mapas temáticos para cada área hidrográfica de Colombia, y se identificaron algunas áreas del país en las que se vienen adelantando actividades de monitoreo de ecosistemas acuáticos; de esta forma, se concluye que las herramientas del SIG, la cartografía social participativa y el uso de imágenes de sensores remotos son necesarios para diseñar la metodología que permita monitorear los ecosistemas acuáticos del país a diferentes escalas espaciales y temporales.

Así mismo, la realización del taller internacional de expertos entre febrero y marzo de 2021, permitió recopilar datos e información de interés, según las

experiencias de los profesionales con trayectoria en el monitoreo de ecosistemas acuáticos. Se identificaron diferentes insumos que pueden ser revisados e incorporados en el Promsea y tratados mediante herramientas SIG.

Se evidencia que gran parte de las metodologías propuestas por los institutos y entidades del SINA, así como por las instituciones educativas, plantean modelos conceptuales y geográficos que incluyen aspectos socio ecológicos, a partir de los que se establecen las relaciones existentes entre la comunidad de un área de interés con el recurso hídrico de la zona. Sin embargo, desde el Promsea se propone analizar diferentes factores aparte de estos, que estén involucrados en los ecosistemas acuáticos, razón por la cual es necesario estudiar variables de diferentes tipos.

A partir de lo propuesto mediante las metodologías de análisis espacial y SIG, se identificó que las unidades de análisis deben diferenciarse, según las escalas espaciales nacional, regional y local, de modo que esté acorde con la información geográfica oficial disponible, así como los fenómenos de afectación y los métodos de medición de variables para cada una. Se recomienda una diferenciación entre los ecosistemas acuáticos continentales, marinos, costeros e insulares, cuando se realice la revisión de las variables, índices e indicadores para la construcción de las propuestas de modelos para el monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos.

Las propuestas metodológicas existentes, por el momento, en cuanto a la delimitación y el monitoreo de los ecosistemas acuáticos muestran que los insumos geográficos oficiales existentes no son generados de forma continua, lo cual dificulta la comparación temporal de estos por tratarse de diferentes años. De allí, surge la necesidad de incluir el uso de imágenes satelitales en la metodología propuesta desde el componente SIG, teniendo presente que tanto para los datos de tipo vectorial

como para los datos ráster se debe hacer un análisis previo de los insumos para determinar a qué escala espacial se puede trabajar con estos.

Dado que el Promsea se propone para ser implementado a escala nacional, también deben analizarse casos en los que la escala de trabajo sea más detallada, sin olvidar que de esto depende la adquisición de los insumos.

Asociado a esto, es recomendable que al momento de definir las ventanas piloto para la fase de implementación del Promsea se conozcan los antecedentes, la documentación, los archivos geográficos y las investigaciones de dichas áreas. Entre más información exista, mejores serán los resultados pues se contará con una base para hacer los análisis correspondientes mediante la identificación de variables e indicadores.

Por lo anterior, la revisión de las propuestas carto-

gráficas para la delimitación de ecosistemas acuáticos epicontinentales y marino costeros, permite establecer la línea base e identificar las variables a tener en cuenta para la propuesta de zonificación de ecosistemas acuáticos para el Promsea, razón por la cual se sugiere partir del análisis de los ecosistemas síntesis de tipo acuático, presentados en el mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia a escala 1 : 100.000 del año 2017 (Ideam *et al.*, 2020). Por esto, se recomienda establecer un modelo conceptual donde se establezcan los aspectos necesarios para lograr implementar las metodologías propuestas a futuro, teniendo a la vez un referente teórico.

El establecer las áreas mediante metodologías de delimitación y zonificación de unidades de análisis, hace posible que se propongan y ajusten las normativas ambientales nacionales relacionadas con el uso de los ecosistemas a fin de cumplir los objetivos del Protocolo, según las ventanas piloto de



Bogotá - Puente Guaduas calle 80

monitoreo que se vayan definiendo para su implementación.

Es así como la metodología propuesta para la zonificación de los ecosistemas acuáticos, es un primer abordaje para la planificación ambiental asociada al manejo integrado de este tipo de ecosistemas a nivel nacional, con el fin de definir cuáles superficies de agua deben ser monitoreadas. Ello se define a partir de variables de clima, geomorfología, suelos, pendiente y coberturas de la tierra, pues permiten establecer variables espaciales a partir de las cuales se puede analizar la presencia de factores involucrados en la formación de los ecosistemas, y cómo estos influyen directamente en sus cambios.

Sin embargo, los criterios definidos para la propuesta de zonificación de los ecosistemas acuáticos se basan en aspectos físicos, debido a que, por el momento, es la información más acorde, que se relaciona con la formación, permanencia y estado de las superficies de agua. Así mismo, es relevante aclarar que la propuesta metodológica podrá ser ajustada, incorporando variables socioeconómicas, hidrobiológicas e hidrológicas, a medida que se vaya contando con información geográfica oficial y actualizada que cumpla con los parámetros cartográficos para ser incluidas, como son la escala (nacional, regional o local), la temporalidad, y su actualización periódica.

Según los resultados obtenidos al aplicar la metodología de evaluación multicriterio mediante el PAJ, se identificaron aquellas zonas con potencial bajo, medio y alto para el monitoreo de los ecosistemas acuáticos de la ventana piloto. El uso de esta metodología permitió identificar, priorizar y cumplir con el objetivo de la actividad de este producto; sin embargo, la jerarquía establecida debe ser evaluada en conjunto con expertos de diferentes temáticas para contar con su evaluación y su punto de vista respecto a los criterios repre-

sentados por las variables mencionadas. Las variables deben ser analizadas en detalle, por tratarse del punto de partida para implementar el PAJ, y definir las relaciones entre las mismas que luego permitirán analizar la influencia de cada una en los resultados finales. Para esto, se recomienda crear mesas técnicas para la creación de diferentes versiones de la matriz de comparación de criterios, y así definir los niveles de importancia de acuerdo con los factores seleccionados considerados como variables relevantes.

La metodología planteada respecto al procesamiento digital de imágenes satelitales cumple con los objetivos del Promsea, debido a que permite tener resultados de los cambios existentes entre diferentes periodos de tiempo, y analizar el estado de los ecosistemas acuáticos, así como analizar variables físicas, hidrológicas e hidrobiológicas mediante el cálculo de índices espectrales. No obstante, es imprescindible subrayar que para este tipo de metodologías se debe contar con los mejores insumos, en términos de mayor cantidad de imágenes para que no haya vacíos de información y mejores características técnicas de los sensores como son la resolución espacial y temporal principalmente.

A pesar de su robustez, estos procesos de análisis de imágenes satelitales demandan mucho tiempo, por lo cual, se sugiere contar con un equipo de personas expertas en SIG y teledetección para avanzar en periodos de tiempo más cortos y así contar con los resultados que aporten al Promsea a nivel nacional, teniendo cubrimiento de diferentes ventanas piloto para las cinco áreas hidrográficas del país. De la misma manera, es fundamental realizar labores de verificación en campo de los ecosistemas acuáticos, con el fin de validar los resultados obtenidos mediante el procesamiento digital de imágenes de sensores remotos.

Componente hidrológico

Si bien en el país el recurso hídrico es uno de los componentes que más información puede contener en el SIAC, es evidente que hay una gran debilidad en la constancia del monitoreo y en la disponibilidad y análisis de la información. La revisión de la información evidencia que, a nivel regional, son muy pocas las autoridades que están abriendo sus datos y disponiéndolos en los sistemas nacionales. Esto dificulta el flujo de información para la construcción de líneas base que mejoren la generación y/o ajustes de indicadores que den cuenta de la realidad del recurso. Ello puede repercutir en una inadecuada gestión de los ecosistemas acuáticos.

Es muy probable que al momento de la implementación del Promsea, se encuentre información que, aunque no esté dispuesta en los sistemas, si sea producto de años de monitoreo. Por ello es imprescindible que se generen mejores rutas de operación con los sistemas, que se optimice la capacitación con las autoridades regionales para el cargue de los datos de los monitoreos y que ojalá, las mismas entidades, logren la destinación de recursos para que este proceso sea más relevante en sus ejecuciones anuales.

También es necesario que las entidades encargadas del monitoreo del agua en el país, llámense institutos, autoridades, academia o consultorías entre otras, puedan llegar a acuerdos sobre las variables, unidades y rangos con que se debe analizar el recurso hídrico. En la actualidad, hay más de 230 variables de monitoreo registradas en los sistemas, muchas de ellas con más de seis formas de análisis y con diversas unidades de reporte no homologables. Esto deja ver la necesidad de realizar ejercicios nacionales que permitan reevaluar las métricas con que se están monitoreando los

ecosistemas acuáticos y, de paso, optimizar los recursos destinados debido a la escogencia de variables claves suficientes para hacer un adecuado análisis del estado de estos sistemas. Es urgente que el país haga un ejercicio de evaluación de la calidad de la información.

Igualmente, a nivel nacional existe una gran necesidad de realizar ajustes normativos para la regulación del recurso hídrico. Durante las visitas regionales y los diversos talleres para la construcción del Promsea, fue recurrente la observación de que los valores de los límites de detección de las variables no están ajustados a la necesidad y realidad de los ecosistemas acuáticos y se están tomando decisiones erradas que ponen en peligro la estabilidad de este recurso vital.

Para poder ir realizando estos ajustes, el Promsea ofrece los lineamientos para no solo evaluar el estado del recurso, sino también las relaciones ecosistémicas y sociales que están transformando los sistemas acuáticos del país. Es importante analizar el agua desde diferentes aristas, por ejemplo, con base en el uso del suelo circundante al cuerpo de agua, entender que los cambios en la calidad y cantidad se empiezan a manifestar desde otras matrices de análisis y que existen más presiones a parte de los vertimientos directos. Por tanto, no se puede analizar con una sola presión. Todas inciden y por lo tanto ameritan regulación, control y seguimiento.

Unido a la necesidad del monitoreo de otras presiones sobre el recurso, está el de integrar los ecosistemas acuáticos marinos costeros e insulares en las evaluaciones nacionales del agua, las cuales son una guía muy valiosa para la gestión del recur-

so en el país. En los diferentes diálogos nacionales, durante la construcción el Promsea, se recalcó que Colombia también es mar.

Si bien la gran diversidad de ecosistemas acuáticos del país ofrece un gran reto para su monitoreo y seguimiento, es importante que a nivel nacional se pueda garantizar que este proceso sea sostenible, robusto y que responda a las presiones que están

transformando su dinámica natural y enfocados a analizarlos desde diferentes matrices complementarias (físicas, químicas, microbiológicas, biológicas y sociales). De esta manera, se tendrán mejores resultados y, a mediano plazo, se podrán aportar en el proceso de regionalización. Así, en el futuro, se podrá gestionar este recurso y saber con qué cuenta el país.

Componente Hidrobiológico

Es importante tener presente la realidad del país en estos procesos de construcción nacional, principalmente en términos del déficit económico y técnico que tiene el sector ambiental, reflejado en la imposibilidad de realizar esfuerzos continuos de

monitoreo. Un ejemplo de esto es la dificultad en la implementación de más de un bioindicador, pues para las autoridades regionales genera altos costos.



- Se debe fortalecer la investigación en otros grupos hidrobiológicos que puedan brindar mejor información sobre el estado de los ecosistemas acuáticos; no solo son algas, peces y macroinvertebrados los que habitan el agua.
- Contar con personal especializado para el muestreo y análisis de las comunidades hidrobiológicas es primordial para garantizar una correcta evaluación del estado de los ecosistemas acuáticos. El país tiene un déficit alto en formación de taxónomos.
- Es necesario unificar las escalas y hacer cumplir los tiempos mínimos de monitoreo nacional y regional de las comunidades hidrobiológicas.
- Los principales problemas de validación de datos hidrobiológicos en el país corresponden al poco conocimiento de los protocolos; a protocolos no estandarizados ni diferenciados para la diversidad de ecosistemas; al bajo nivel de compatibilidad de la información obtenida; a la falta de capacitación y métodos normalizados.
- Se sugiere establecer una guía nacional para orientar los procesos de monitoreo, con otros de gestión, coordinación, comunicación y articulación; asociados a las fortalezas y misiones, para tener un resultado costo eficiente óptimo.
- Se propone que los datos oceanográficos se incluyan en los procesos de monitoreo y se robustezcan los datos y su disponibilidad, en lugar de que se concentren en los buques oceanográficos.
- En general, la calidad de la información de los datos alojados en el SIAC es buena; sin embargo, se dificulta su acceso y no refleja la totalidad de la información que manejan las autoridades ambientales regionales u otras entidades ambientales.
- Se requieren capacitaciones continuas sobre el uso y manejo de las plataformas de los sistemas de información donde se alojan los datos de indicadores físicos y químicos y/o los datos hidrobiológicos que se generan en el país.

Componente socioeconómico

- Es vital integrar, a los análisis del Promsea, la información existente sobre la demanda hídrica socioeconómica. Para esto se hace necesaria la revisión y estandarización de las metodologías de registro de datos relacionados en el SIAC, específicamente en sistemas como SIRH. En este sentido, sería pertinente definir un formulario único con categorías clave para el análisis nacional o, de ser necesarios varios formularios, generar un número de identificación único para cada registro y que este sea obligatorio, en todos los formularios, con el fin de poder integrar la totalidad de la información a la base de datos.
- Adicional a la demanda hídrica relacionada con el caudal utilizado, es necesario incorporar los resultados de variables físicas, químicas y biológicas de los monitoreos realizados en áreas de influencia de proyectos sectoriales, con el fin de incluir la información en las metodologías de análisis de los fenómenos de transformación definidos en el Promsea. Al respecto, sería importante revisar la posibilidad de generar una estrategia de integración y/o interoperabilidad de las bases de datos del SIRH y la Anla.

- Se considera prioritario trabajar en estrategias que permitan garantizar la interoperabilidad entre los SIAC y otros sistemas, como aquellos en donde se dispone información sectorial considerada de relevancia para la implementación del Promsea.
- Se debe revisar la incorporación de variables e indicadores relacionados con la influencia del sector turístico, al menos en áreas de PNN.
- La identificación del uso del suelo y la estimación del cambio constituyen un reto de importancia para el sector ambiental debido a la carencia de información periódica al respecto, a pesar de la importancia de esta variable en relación con los procesos de monitoreo del estado de los ecosistemas del país. De acuerdo con lo anterior, es preciso trabajar en una estrategia articulada para la generación de esta información.
- Con el fin de incorporar ventanas piloto de áreas de influencia de proyectos sectoriales, se hace necesario garantizar la realización de una nutrida línea base que considere las variables mínimas identificadas en el marco del Promsea, con varias estaciones y considerando al menos dos periodos hidrológicos. Con base en ello, se podría desarrollar una red de estaciones de monitoreo que durante la operación considere zonas de referencia y zonas de operaciones. Posteriormente, se deben realizar monitoreos hasta donde se hayan proyectado los efectos, que contemplen puntos donde se efectúen acciones de manejo para evaluar su efectividad.
- Es importante crear y/o fortalecer las capacidades administrativas, técnicas y financieras de las instituciones y autoridades ambientales del país para evaluar la bioacumulación de contaminantes en tejido animal y vegetal, los cuales se encuentran relacionados con las actividades minera y de hidrocarburos. Lo anterior teniendo en cuenta que constituye uno

de los principales efectos sobre los ecosistemas acuáticos.

- Aunque la clasificación de ecosistemas acuáticos realizada hasta el momento, en el país, ha estado basada en características biofísicas, es vital comenzar a utilizar criterios de clasificación que permitan determinar las principales actividades y tendencias socio-económicas, en las diferentes escalas e integrar. De acuerdo con estas, trabajar para que en el monitoreo se detecten los posibles impactos sobre estos ecosistemas.
- La hoja de ruta planteada en el Promsea, para la clasificación de SZH y UAC, de acuerdo con la presencia y tendencias de actividades socioeconómicas, es un primer acercamiento a la posibilidad de clasificar estas unidades de análisis con base en la información geográfica oficial existente y disponible. Si bien solo es una hoja de ruta metodológica, se espera que luego surjan ajustes que permitan obtener los mejores resultados (validación).
- Se recomienda la realización de un taller con la Anla, con el fin de definir las variables complementarias a integrar.
- Se considera necesaria y pertinente la inclusión de procesos de monitoreo comunitario participativo, en el marco de la implementación del Promsea. Las experiencias exitosas han demostrado las fortalezas e impactos positivos de una adecuada implementación del Monitoreo Comunitario Participativo (MCP).
- Entre los principales retos identificados para la implementación de procesos MCP, se encuentran: i) establecer lineamientos mínimos para su implementación, ii) armonizar la visión e intereses de los diferentes actores del territorio, iii) fomentar el interés en la implementación de este tipo de procesos, iv) garantizar la financiación (sostenibilidad) y v) fortalecer las capacidades institucionales para desarrollar este tipo de procesos.

- De acuerdo con la revisión realizada para la construcción de los lineamientos mínimos para la inclusión de procesos de MCP, en la implementación del Promsea ventanas piloto y con los resultados obtenidos del taller internacional sobre experiencias en monitoreo y seguimiento de ecosistemas acuáticos, se evidenció la necesidad de generar espacios de intercambio de buenas prácticas y lecciones aprendidas de la implementación de MCP. desarrollados en el país, documentarlos, evaluarlos y diseñar una propuesta conjunta y

unificada del sector ambiental, en torno a su inclusión.

- La implementación de procesos de MCP, requerirá el desarrollo de herramientas tecnológicas de fácil acceso y uso comunitario, asegurar la capacitación de la comunidad en relación con estas herramientas y, evaluar la posibilidad de generación de un sistema de acceso público para que las comunidades registren los datos de monitoreo.

Proceso estadístico

- El proceso estadístico constituye un elemento transversal que, aunque complejo, debe ser considerado en el monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos, para garantizar que la información recolectada sea comparable, precisa y pueda ser interpretada a largo plazo.

- Dentro de las dificultades que enfrenta el proceso del monitoreo de ecosistemas acuáticos, está la construcción de la línea base para conocer el estado actual de los ecosistemas acuáticos. De esta manera, con el monitoreo, los tomadores de decisiones pueden contar con información de los cambios a lo largo del tiempo, y tomar decisiones respecto al cuidado y la conservación. La complejidad de este proceso radica en el monitoreo de forma integrada, ya que abarca diversos componentes (hídricos, biológicos, físicos y socioeconómicos). Con esta información se puede proyectar el estado del ecosistema.

- Se advierte la necesidad de contar con procesos de homologación de las diversas capas cartográficas, propuestas para la selección de ecosistemas y ventanas de implementación, razón por la cual desde el componente esta-

dístico se sugiere la ruta para identificación de estas zonas y subzonas priorizadas.

- Para el proceso de implementación y validación, desde el componente estadístico, se recomienda realizar pruebas en ventanas piloto, antes de aplicar el protocolo a nivel nacional. Esto con el objetivo de validar los instrumentos y procedimientos, en campo, para la recolección de datos y su análisis. Se deben poder obtener estimaciones iniciales para el cálculo del tamaño de la muestra, probar formularios o cuestionarios de recolección de datos, probar los procedimientos de asignación al azar y estimar recursos para la sostenibilidad real del proceso.

- Para la selección de las ventanas piloto de implementación es recomendable escoger zonas que tengan heterogeneidad ecosistémica; de esta manera, son diferentes los retos y ajustes y se podrá perfilar mejor el alcance nacional a partir de las enseñanzas de cada una de estas ventanas.

- Para el caso de la información consignada en los Siac articulados al proceso, estos deben surtir una serie de revisiones y ajustes

para que los datos puedan ser usados en el proceso de análisis de los ecosistemas acuáticos. Por ejemplo, a pesar de que los datos de SIRH contienen bastante información que puede y debe ser explotada en beneficio del Promsea, la calidad de la información es baja, ya que no existe un diccionario de variables de los datos registrados en sistema. Es indispensable revisar y homogenizar el registro de las unidades de medida de los parámetros

reportados y el método determinante, pues dichos registros se encuentran sin una estructura definida, lo cual dificulta y alarga el análisis de los datos y de las conclusiones de estos. Asimismo, es necesario inspeccionar los valores máximos y mínimos aceptados de cada variable para poder realizar ejercicios de métodos determinantes, eliminando los posibles errores en dichos valores y dar confiabilidad estadística al dato.

Ruta de implementación y validación

- Una vez inicie la Fase III del Promsea, correspondiente a la consolidación de la estrategia de implementación y validación, es importante establecer mesas de trabajo nacionales y regionales con expertos en el monitoreo y seguimiento de ecosistemas acuáticos (institutos de investigación, autoridades ambientales regionales, organizaciones sin ánimo de lucro, academia y sectores privados, entre otros), con el fin de garantizar su acompañamiento en la consolidación de las metodologías planteadas en la hoja de ruta y en la generación de estrategias necesarias para el robustecimiento del proceso de regionalización.
- Las metodologías propuestas para la priorización de unidades de análisis y para su clasificación de acuerdo con la presencia de actividades socioeconómicas serán lideradas por el Ideam, en el marco del desarrollo de la Fase III del Promsea. Lo anterior, con el fin de generar categorías únicas de análisis para la escala nacional, así como un único mapa que refleje los resultados obtenidos para cada caso, requisito fundamental para la futura generación de una operación estadística acorde con el diseño del Marco Geoestadístico planteado para el Promsea.
- Para que los actores a cargo del monitoreo de los ecosistemas acuáticos en las ventanas piloto de implementación identificadas puedan definir uno o varios de los fenómenos de transformación priorizados en el Promsea, es importante no sólo identificar las presiones bajo las cuales se va a analizar el estado de los ecosistemas, sino los tiempos en los cuales se espera que estas generen algún cambio significativo sobre los mismos (escala temporal para la evaluación del fenómeno de transformación). Esto permitirá una mejor planeación, en términos de gestión administrativa y técnica, para la implementación en relación con el tiempo necesario para su monitoreo y seguimiento y los resultados esperados en el corto, mediano y largo plazo.
- Durante el proceso de implementación y validación del Promsea en ventanas piloto, será fundamental establecer metodologías para la evaluación periódica de las diferentes variables, índices e indicadores seleccionados para el monitoreo, con el fin de identificar a tiempo los ajustes necesarios para garantizar que la información colectada ofrezca insumos relevantes para la evaluación del estado de los ecosistemas acuáticos.

- El diseño muestral para la implementación del Promsea, en ventanas piloto, deberá considerar la importancia del sincronismo en la toma de datos, teniendo en cuenta las características particulares de las variables de los diferentes componentes y, como objetivo primordial, el levantamiento de información que permita el análisis de acuerdo con los modelos conceptuales y metodológicos planteados en el Promsea para los fenómenos de transformación priorizados.
- Si bien en el país existen protocolos y guías para el monitoreo de los diferentes componentes de los ecosistemas acuáticos, es importante que, una vez seleccionadas las ventanas de implementación, estos surtan un proceso de revisión y adaptación a las necesidades y características específicas del ecosistema a monitorear, para así garantizar que el esfuerzo de muestreo permita obtener los datos necesarios y relevantes para el análisis del estado del ecosistema, según el fenómeno de transformación seleccionado.
- Se debe considerar la necesidad de garantizar una adecuada estructuración de los productos geográficos que se pretendan utilizar y generar en el marco del proceso de implementación y validación del Promsea, teniendo en cuenta las instrucciones y el acompañamiento del grupo del SIAC del Ideam.
- La articulación intra e interinstitucional constituye la base para fortalecer el proceso y viabilizar la implementación y validación del Promsea, en ventanas piloto, permitiendo aunar esfuerzos entre grupos y entidades que adelantan iniciativas de monitoreo y seguimiento de los ecosistemas acuáticos del país.
- Los lineamientos mínimos para la inclusión de procesos de MCP, en el marco de la implementación del Promsea en ventanas piloto, constituyen una hoja de ruta general orientadora, por lo que el detalle metodológico tendrá que ajustarse al contexto de la zona o región de monitoreo, con el fin de garantizar un adecuado proceso de acercamiento y trabajo concertado con los actores identificados en territorio.



Parque Natural Amacayacu - Amazonas

Referencias

- Abell, R., Thieme, M. L., Revenga, C., Bryer, M., Kottelat, M., Bogutskaya, N., Coad, B., Mandrak, N., Balderas, S.C., Bussing, W., Stiassny, M. L. J., Skelton, P., Allen, G. R., Unmack, P., Naseka, A., Ng, R., Sindorf, N., Robertson, J., Armijo, E., Higgins, J. V., Heibel, T. J., Wikramanayake, E., Olson, D., López, H. L., Reis, R. E., Lundberg, J. G., Sabaj Pere, M. H. & Petry, P. (2008). Freshwater ecoregions of the world: a new map of biogeographic units for freshwater biodiversity conservation. *BioScience*, 58, 403-414.
- Acharya T., Subedi, A., Huang, H. & Lee, D. (2019). Application of Water Indices in Surface Water Change Detection Using Landsat Imagery in Nepal. *Sensors and Materials*, 31(5), 1429-1447 https://www.researchgate.net/publication/333147142_Application_of_Water_Indices_in_Surface_Water_Change_Detection_Using_Landsat_Imagery_in_Nepal
- Agencia Nacional de Tierras [ANT]. (2021). Geoportál de datos abiertos de la Agencia Nacional de Tierras [Capas cartográficas en línea]. Bogotá, Colombia. <https://data-agenciadetierras.opendata.arcgis.com/>
- Albert, J. S., Destouni, G., Duke-Sylvester, S. M., Magurran, A. E., Oberdorff, T., Reis, R. E., Winemiller, K. O. & Ripple, W. J. (2020). Scientists' warning to humanity on the freshwater biodiversity crisis. *Ambio*, 50(1), 85-94. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01318-8>
- Alford, D. P., Delaune, R. D. & Lindau, C. W. (1997). Methane flux from Mississippi River deltaic plain wetlands. *Biogeochemistry*, 37, 227-236. <https://doi.org/10.1023/A:1005762023795>
- Allan, J. D. & Castillo, M. (2007). *Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters*. 2ª ed., Países Bajos, Springer.
- Alonso, J. C. & Fabrè, N. N. (2005). Definición del stock pesquero del dorado (*Brachyplatystoma rousseauxii*) en la cuenca Amazónica a través de su estructura por edades. En: Jean François Renno, Carmen García, Fabrice Duponchelle y Jesús Nuñez. (Eds.), *Biología de las Poblaciones de Peces de la Amazonía y Piscicultura*, (pp. 36-41). Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana (IIAP) y Institut de Recherche pour le Développement (IRD). <http://www.iiap.org.pe/upload/publicacion/L029.pdf>
- Alonso, S. (1989). Los métodos multicriterio en la programación de actividades agrarias. Ediciones Mundi Prensa.
- Altor, A. E. & Mitsch, W. J. (2006). Methane flux from created riparian marshes: Relationship to intermittent versus continuous inundation and emergent macrophytes. *Ecological Engineering*, 28, 224-234. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.06.006>
- Álvarez-Arango, L. (2005). Metodología para la utilización de los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Amoros, C. & Bornette, G. (2002). Connectivity and biocomplexity in waterbodies of riverine floodplains. *Freshwater Biology*, 47, 761-776.
- Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment, *Marine Pollution Bulletin*, 62, 1596-1605. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>

- Angermeier, P.L. & Karr, J.R. (1986). Applying an Index of Biotic Integrity Based on Stream-Fish Communities: Considerations in Sampling and Interpretation. *North American Journal of Fisheries Management*, 6(3), 418-429.
- Arita, T. & Rodríguez, P. (2001). Ecología geográfica y macroecología. En: Llorente, Jorge y Morrone, Juan (Eds.). *Introducción a la biogeografía en Latinoamérica: teorías, conceptos, métodos y aplicaciones*, (pp. 63-80). Las Prensas de Ciencias, Facultad de Ciencias, UNAM. <http://www.libros.unam.mx/digital/V8/40.pdf>
- Ariza, A., García S., Rojas, S., & Ramírez, M. (2014). Desarrollo de un modelo de corrección de imágenes de satélite para inundaciones: (CAIN - Corrección Atmosférica e Índices de Inundación). UNSPIDER-IGAC, 1-10. https://www.researchgate.net/publication/313346186_Desarrollo_de_un_modelo_de_correccion_de_imagenes_de_satelite_para_inundaciones_CAIN_-_Correccion_Atmosferica_e_Indices_de_Inundacion
- Arndt, U. & Schweizer, B. (1991). The use of bioindicators for environmental monitoring in tropical and subtropical countries. En Ellenberg, H. (Ed.). *Biological monitoring. Signals from the environment*, (pp. 199-260). Vieweg.
- Arriaga-Cabrera, L., Aguilar-Sierra, V. & Alcocer-Durand, J. (2000). Aguas continentales y diversidad biológica de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Aubriot, L., Bonilla, S. & Kruk, C., 2009. Cianobacterias planctónicas: factores que regulan su crecimiento. En Bonilla, S., (Ed.). *Cianobacterias planctónicas del Uruguay. Manual para la identificación y medidas de gestión*. Documento Técnico PHI-LAC, 16, (pp. 5-11). Unesco. https://www.researchgate.net/publication/317689120_Cianobacterias_planctonicas_factores_que_regulan_su_crecimiento
- Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca [Aunap]. (2019). Documento técnico de cuotas. Dirección técnica de inspección y vigilancia. <https://www.aunap.gov.co/download/documento-tecnico-de-cuotas-2019-2/>
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales [Anla]. (2021). Área proyecto licenciado. Capa geográfica. <http://sig.anla.gov.co:8083/>
- Avendaño, J., Parra, J. & Bayona, J. (2014). Segmentación y clasificación de imágenes SAR en zonas de inundación en Colombia, una herramienta computacional para prevención de desastres. *Revista Ingeuan*, 4(8), 24-38. Universidad Antonio Nariño.
- Banco de la República. (2000). Sectores económicos. La Enciclopedia. https://enciclopedia.banrepublica.org/index.php/Sectores_economicos
- Barkau, R. L. (1985). A mathematical model of unsteady flow through a dendritic network. Colorado State University ProQuest Dissertations & Theses. <https://www.proquest.com/openview/ea9cd1a843217c40a8265908c4d393db/1?pq-origsite-gscholar&cbl=18750&diss=y>
- Barbe, J., Lafont, M., Mallet, L., Mouthon, J., Philippe M. & Vey V. (2003). Actualisation de la méthode de diagnose rapide des plans d'eau. Analyse critique des indices de qualité des lacs et propositions d'indices de fonctionnement de l'écosystème lacustre. Cemagref. Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse. <https://www.documentation.eauetbiodiversite.fr/fr/notice/file/77672>
- Barbe, J., Lavergne, E. & Rofes, G. (1990). Diagnose rapide des plans d'eau. *Informations Techniques du Cemagref*, 79(2).
- Barboza, L. (2015). Control borroso para la valoración del impacto ambiental generado por contaminantes emergentes en aguas residuales hospitalarias. *Gestión y Ambiente*, 18(1), 81-93. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/43541/51442>
- Bartram J., Carmichael W. W., Chorus I., Jones G. & Skulberg O. M. (1999) Introduction. En Chorus I., Bartram J. (Eds.) *Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Management*. (1.a ed.). (pp. 1-14). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482295061>
- Baxendale, C. A. (2009). Geografía, Organización del Territorio y Sistemas de Información Geográfica. En Buzai, G. D. (Ed.) *Geografía y Sistemas de Información Geográfica. Aspectos conceptuales y aplicaciones* (1.a ed.). (pp. 37-49). Universidad Nacional de Luján.
- Bedoya-Rios, D. F., Lara-Borrero, J. A., & Enriquez-Hidalgo, A. M. (2018). Ocurrencia de contaminantes emergentes en el ciclo urbano del agua, caso Bogotá. En D. Cardona, A. Toro, L. Sánchez & J. Latorre (Comp.) *Desafíos en la gestión integral del agua: ahorro, uso eficiente y microcontaminantes* (pp. 49-64). Universidad del Valle.

- Beltrán B. & Tavera J. (2019). Colombia país de peces: Biodiversidad de peces marinos del pacífico colombiano. En: La pesca en Colombia: del agua a la mesa (1 ed., pp. 19-22). Agenda del Mar.
- Benítez, J., Delgado-Galván, X., Gutiérrez, J. A. & Izquierdo, J., (2011). Balancing consistency and expert judgment in AHP. *Mathematical and Computer Modelling*, 54(7-8), 1785-1790. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2010.12.023>
- Beran, A., Brilly, M., Becker, A. & Bonacci, O. (Ed.) (1990). Regionalization in hidrology 191. *International Association of Hydrological Sciences (IAHS)*.
- Berumen, S. A., & Llamazares, F. (2007). La utilidad de los métodos de decisión multicriterio (como el AHP) en un entorno de competitividad creciente. *Cuadernos de Administración*, 20(34). https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/cuadernos_admon/article/view/4043
- Bibby, C. J., Collar, N. J., Crosby, M. J., Heath M. F., Imboden, Ch., Johnson, T. H., Long A. J., Stattersfield A. J., & Thirgood, S. J. (1993). Putting Biodiversity on the Map: Priority Areas for Global Conservation. *American Ornithological Society*, 110(2), 423-424.
- Blenckner, T., Järvinen, M. & Weyhenmeyer, G. (2004). Atmospheric circulation and its impact on ice phenology in Scandinavia. *Boreal Environment Research*, 9(5), 371-380.
- Bock, W. J. (2004). Species: the concept, category and taxon. *Journal of zoological systematics and evolutionary research*, 42(3), 178-190. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0469.2004.00276.x>
- Bodelier, P. L. E. & Laanbroek, H. J. (2004). Nitrogen as a regulatory factor of methane oxidation in soils and sediments. *FEMS Microbiology Ecology*, 47(3), 265-277. [https://doi.org/10.1016/S0168-6496\(03\)00304-0](https://doi.org/10.1016/S0168-6496(03)00304-0)
- Boon, P. I. & Lee, K. (1997). Methane oxidation in sediments of a floodplain wetland in south-eastern Australia. *Letters in Applied Microbiology*, 25(2), 138-142. <https://doi.org/10.1046/j.1472-765X.1997.00189.x>
- Botero, P. J., Jiménez, B., Rodríguez, N., Herrera, J. M., Rodríguez, J. V., Mendoza, Y. (1997). Estilo fisiográfico de la Orinoquia-Amazonia Colombiana. *Revista CIAF - Fisiografía*, 18(4), 1-136. IGAC-CIAF.Bravo, J. (2009). Contaminantes emergentes en el agua. *Revista Digital Universitaria*, 10(8), 1-7. <https://www.revista.unam.mx/vol10/num8/art54/int54.htm>
- Buck, S. F. (1960). A method of estimation of missing values in multivariate data suitable for use with an electronic computer. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 22(2), 302-306. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1960.tb00375.>
- Buffam, I., Laudon, H., Temnerud, J., Mörth, C. M. & Bishop, K. (2007). Landscape-scale variability of acidity and dissolved organic carbon during spring flood in a boreal stream network. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 112(1), 1-11. <https://doi.org/10.1029/2006JG000218>
- Bugayevskiy, L. M. and Snyder, J. P. (1995). *Map projections. A Reference Manual*. Taylor & Francis Group.
- Burrough, P.A. & McDonnell, R. (1998). *Principles of geographical information systems for land resources assessment*. Oxford University Press. <https://archive.org/details/principles-of-geographical-information-systems/mode/2up>
- Cadima, E. L. (2003). *Manual de evaluación de recursos pesqueros*. FAO Documento Técnico de Pesca. 393. FAO.
- Calvachi, B. (2010). *Caracterización Ecológica Básica de los Complejos de Humedales en Colombia*. Informe final. Bogotá, D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Ideam.
- Campero, M., Van Damme, P., Arévalo, B. & Claros, D. (2003). Análisis de correspondencia canónica vs. regresión múltiple: ¿pueden mostrar diferencias entre hidro-ecorregiones? *Revista Boliviana de Ecología*, 13, 55-64.
- Cardona, O. D., van Aalst, M. K., Birkmann, J., Fordham, M., McGregor, G., Pérez, R., Pulwarty, R. S., Schipper, E. L. F., & Sinh, B.T., (2012). Determinants of risk: exposure and vulnerability. In C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, K. L. Ebi, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, G. K. Plattner, S. K. Allen, M. Tignor & P. M. Midgley (eds.) *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (pp. 65-108). Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/managing-the-risks-of-extreme-events-and-disasters-to-advance-climate-change-adaptation/>
- Carvajal P. (2007). *Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia*. Servicio Geológico Nacional.
- Casatti, L., Ferreira, C. P. & Langeani, F. (2009). A fish-based biotic integrity index for assessment of lowland streams in southeastern Brazil. *Hydrobiologia*, 623(1), 173-189.
- CGIAR. (2019). Peatland potential untapped in Nationally Determined Contributions, COP 25 delegates say. <https://www.worldagroforestry.org/cifor-and-icraf-at-cop25>
- Charry-Ruiz, J. F. & Guerra-Vargas, L. A. (2020). *Propuesta metodológica para el carbono azul y sus ecosistemas en Colombia: Hoja de ruta del carbono azul en marco del Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 "Pacto por Colombia, pacto por la equidad"*. Documento de trabajo.

- Chasqui V., L., A. Polanco F., A. Acero P., P.A. Mejía-Falla, A. Navia, L.A. Zapata y J.P. Caldas. (Eds.). (2017). Libro rojo de peces marinos de Colombia. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras [Invemar], Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Serie de Publicaciones Generales de INVEMAR # 93. 552 p.
- Cheruvilil, K. S., Soranno, P. A., Bremigan, M. T., Wagner, T. & Martin, S. L. (2008). Grouping lakes for water quality assessment and monitoring: The roles of regionalization and spatial scale. *Environmental Management*, 41, 425-440.
- Chicharo, L., Müller, F., & Fohrer, N. (Eds.). (2015). *Ecosystem Services and River Basin Ecohydrology*. Springer.
- Christensen, T. R., Panikov, N., Mastepanov, M., Joabsson, A., Stewart, A., Öquist, M. & Svensson, B. (2003). Biotic controls on CO₂ and CH₄ exchange in wetlands - A closed environment study. *Biogeochemistry*, 64(3). <https://doi.org/10.1023/A:1024913730848>
- Chuvieco, E. (2010). Teledetección Ambiental, la observación de la Tierra desde el espacio. Ariel.
- Chuvieco, E., Salas, J., & Martín, P. (2008). *Prácticas de Tratamiento Digital de Imágenes*. Universidad de Alcalá.
- Chuvieco, E. (1990). *Fundamentos de teledetección*. (1. a ed.). Unigraf S.A.
- Cicerone, R.J. & Oremland, R.S. (1988). Biogeochemical aspects of atmospheric methane. *Global Biogeochemical Cycles*, 2(4). <https://doi.org/10.1029/GB002i004p00299>
- Clark, J. M., Ashley, D., Wagner, M., Chapman, P. J., Lane, S. N., Evans, C. D. & Heathwaite, A. L. (2009). Increased temperature sensitivity of net DOC production from ombrotrophic peat due to water table draw-down. *Global Change Biology*, 15(4), 794-807. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01683.x>
- Codd, G. A., Morrison, L. F. y Metcalf, J. S. (2005). Cyanobacterial toxins: risk management for health protection. *Toxicol Appl Pharmacol*, 203, 264-272.
- Collinge, S. K. (1996). Ecological consequences of habitat fragmentation: implications for landscape architecture and planning. *Landscape and Urban Planning*, 36, 59-77.
- Collins, M.E. y Kuehl, R.J. (2000). Organic matter accumulation and organic soils. In J. L. Richardson & M. J. Vepraskas (Eds.). *Wetland soils: genesis, hydrology, landscapes and classification* (pp. 137-162). Lewis Publishers.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe [Cepal]. (2019). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. Objetivos, metas e indicadores mundiales. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/40155-la-agenda-2030-objetivos-desarrollo-sostenible-oportunidad-america-latina-caribe>
- Comisión Nacional de Actividades Espaciales (Argentina) [Conae]. (2016). Índices espectrales derivados de imágenes satelitales Landsat 8 Sensor OLI. <https://catalogos.conae.gov.ar/landsat8/Docs/IndicesEspectralesDerivadosDeLandsat8.pdf>
- Comité Técnico del MEC. (2012). Comité Técnico del Mapa de Ecosistemas Continentales, Costeros y Marinos de Colombia (MEC). (2012). Reunión interinstitucional para la definición conceptual de ecosistema. Documento interno, Ideam, Bogotá.
- Conant, R. T., Ogle, S. M., Paul, E. A. & Paustian, K. (2011). Measuring and monitoring soil organic carbon stocks in agricultural lands for climate mitigation. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(3), 169-173. <https://doi.org/10.1890/090153>
- Congreso de la República de Colombia. (1990, 15 de enero). Estatuto General de Pesca [Ley 13 de 1990]. DO: 39.143.
- Convención Ramsar. (2021). La Lista de Humedales de Importancia Internacional. <https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/sitelist.pdf>
- Convención Ramsar. (2015). El Cuarto Plan Estratégico para 2016-2024. Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas - la "Convención de Ramsar." https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/4th_strategic_plan_2016_2024_s.pdf
- Convención Ramsar. (2016). Introducción a la Convención sobre los Humedales. Manual de Ramsar 1, 5ª edición. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland, Suiza. https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/handbook1_5ed_introductiontoconvention_final_e.pdf
- Convenio de Diversidad Biológica [CDB]. (1992). Documento de trabajo. <http://www.humboldt.org.co/images/documentos/pdf/Normativo/1994-ley165-1994.pdf>

- Convenio Protección Medio Marino. (2018). Proyecto de Ley, "por medio de la cual se aprueba el «Protocolo relativo a la contaminación procedente de fuentes y actividades terrestres del Convenio para la protección y el desarrollo del medio marino de la región del Gran Caribe», adoptado en Oranjestad, Aruba, el 6 de octubre de 1999". <https://leyes.senado.gov.co/proyectos/images/documentos/Textos%20Radicados/proyectos%20de%20ley/2017%20-%202018/PL%20245-18%20Protocolo%20Marino.pdf>
- Córdoba-Avalos, A., Alcántara-Carbajal, J. L., Guzmán-Plazola, R., Mendoza-Martínez, G. D. & González-Romero, V. (2009). Desarrollo de un índice de integridad biológica avifaunístico para dos asociaciones vegetales de la reserva de la biósfera Pantanos de Centla, Tabasco. *Universidad y Ciencia. Trópico Húmedo*, 25(1), 1-22.
- Corporación Autónoma Regional del Río Grande de La Magdalena [Cormagdalena]. (2007). Atlas Cuenca del Río Grande de La Magdalena.
- Cuéllar, J. L., López-Delgado, E. O. & Villa-Navarro, F.A. (2018). Effect of the riparian vegetation cover on fish communities in the humid premontane and very humid premontane forest in the Upper Magdalena, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 42 (163), 216-226.
- Cummins, K. W., Merritt, R. W., & Andrade, P. (2005). The use of invertebrate functional groups to characterize ecosystem attributes in selected streams and rivers in southeast Brazil. *Studies on Neotropical Fauna and Environment*, 40(1), 71-90.
- Cursosgis. (s.f.). ¿Qué es HEC – RAS y para qué sirve? <https://www.cursosgis.com/que-es-hec-ras-y-para-que-sirve/>
- Davies, J., & Giesen, W. (1994). Towards a methodology for identifying tropical freshwater wetlands for protection. *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Mitteilungen*, 24(1), 27-39. <https://doi.org/10.1080/05384680.1994.11904022>.
- De Bie, T., De Meester, L., Brendonck, L., Martens, K., Goddeeris, B., Ercken, D., Hampel, H. & Denys, L. (2012). Body size and dispersal mode as key traits determining metacommunity structure of aquatic organisms. *Ecology Letters*, 15(7), 740-747.
- De León Otero, F. A., & Llain Torrado, N. A. (2017). Evaluación de alteración de la conectividad hidráulica entre el Río Sinú y el complejo de ciénagas de Lorica a través del caño Bugre por medio de un modelamiento en HEC-RAS [Tesis de pregrado, Universidad de La Salle]. Repositorio Institucional Ciencia Unisalle. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/102
- Deagostini, D. (1984). Introducción a la fotogrametría. Curso especial. Editorial Cultural Ltda.
- Del Bosque González, I., Fernández Freire, C., Martín-Forero Morente, L. & Pérez Asensio, E. (2012). Los Sistemas de Información Geográfica y la Investigación en Ciencias Humanas y Sociales. Confederación Española de Centros de Estudios Locales (CSIC).
- Del Castillo, P. (2012). Modelo para el tratamiento de conjuntos complejos con datos ausentes de variables categóricas en un contexto de e-democracia: Aplicación a encuestas de opinión (Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid).
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística [Dane]. (2021). Ficha metodológica Censo Nacional de Población y Vivienda 2018.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística [Dane]. (2020). Manual de uso del marco geoestadístico nacional en el proceso estadístico. https://geoportal.dane.gov.co/descargas/descarga_mgn/Manual_MGN.pdf
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística [Dane]. (2019). Sistema de información del medio ambiente de los países de la comunidad andina (SIMA). <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/ambientales/indicadores-ambientales-iaii/iniciativa-sima>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística [Dane]. (2017). Gran Encuesta Integrada de Hogares (GEIH): Módulo de Servicios Públicos. Bogotá.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística [Dane]. (2017a). Manual para el manejo integral de residuos sólidos y peligrosos.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística [Dane]. (2017b). Nuestro DANE. <http://intranet.dane.gov.co>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2014). Lineamientos para el diseño, construcción y actualización de marcos estadísticos. Bogotá, Colombia. https://sigi.sic.gov.co/SIGI/files/mod_documentos/anexos/2081/lineamientos%20para%20documentar%20PE.pdf
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2005). Censo General 2005: Colombia, una nación multicultural. Bogotá, Colombia: DANE. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-general-2005-1>
- Departamento Nacional de Planeación [DNPI]. (2015). Plan Director de Aguas Residuales en Colombia.

- Departamento Nacional de Planeación [DNPI]. (2013). Definiciones unificadas para la elaboración de documentos, manuales, guías, instructivos y presentaciones.
- Di Gregorio, A., & Jansen, L. J. M. (2005). Land Cover Classification System Classification concepts and user manual Software version (2). In 8 EaNRS. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Díaz, L. G. (2002). Estadística Multivariada: Inferencia y Métodos. (1.a ed.). Universidad Nacional de Colombia.
- Díaz, S., Tilman, D., Fargione, J., Chapin III, F.S., Dirzo, R., Kitzberger, T., Gemmill, B., Zobel, M., Vilà, M., Mitchell, C., Wilby, A., Daily, G.C., Galetti, M., Laurance, W.F., Pretty, J., Naylor, R., Power, A. & Harvell, D. (2005). Biodiversity regulation of ecosystem services. En R. Hassan, R. Scholes, y N. Ash (Eds.) Ecosystems and human well-being: Current state and trends., pp. 297-329. Millennium Ecosystem Assessment.
- Dickens, C., Rebelo, L. M. & Nhamo, L. (2017). Guidelines and indicators for Target 6.6 of the SDGs: "Change in the extent of water-related ecosystems over time". Report by the International Water Management Institute. CGIAR Research Program on Water, Land and Ecosystems (WLE).
- Dinnerstein, E., Olson, D. M., Graham, D. J., Webster, A. L., Primm, S. A., Bookbinder, M. P. & Ledec, G. (1995). Una evaluación del estado de conservación de las eco-regiones terrestres de América Latina y del Caribe. Fondo Mundial para la Naturaleza y Banco Mundial.
- Dirección General Marítima, [Dimar]. (2019). Dimar en Datos. Boletín técnico y estadístico 2018. Bogotá D.C., Colombia: Dirección General Marítima. <https://doi.org/10.26640/2665539X.2018>
- Dirección General Marítima, [Dimar]. (2019a). Estadísticas Transporte Marítimo 2019. Bogotá D.C., Colombia. https://www.dimar.mil.co/sites/default/files/informes/pdfabrochuer_de_transporte_maritimo_2019.pdf
- Dirección General Marítima, [Dimar]. (2020). Estadísticas Anuales 2020. Bogotá D.C., Colombia. <https://www.dimar.mil.co/sites/default/files/noticias/Estad%C3%ADsticas%20Anuales%20de%20Transporte%20Mar%C3%ADtimo%20en%20Colombia.pdf>
- Dirección General Marítima, [Dimar]. (2021). Estadísticas marítimas y portuarias de Colombia 2021. Bogotá D.C. <https://www.dimar.mil.co/sites/default/files/informes/PDFA%20Estad%C3%ADstica%20Anuales%20de%20Transporte%20Mar%C3%ADtimo%20en%20Colombia.pdf>
- Dirección General Marítima Autoridad Marítima Colombiana [Dimar]. (2021a). ¿Qué es la Dirección General Marítima (Dimar)? Conozca Dimar. <https://www.dimar.mil.co/que-es-dimar-mision-y-vision>
- Dise, N. (2009). The wetlands handbook (E. Maltby & T. Barker, Eds.). Oxford, Wiley-Blackwell.
- Domínguez, E., Giorgi, A. (2020). Los indicadores biológicos como herramientas de gestión de la calidad del agua. En E. Domínguez, A. Giorgi & N. Gómez (Comps.). La bioindicación en el monitoreo y evaluación de los sistemas fluviales de la Argentina: Bases para el análisis de la integridad ecológica. Editorial Eudeba. 20-25.
- DoNascimento, C., Herrera Collazos, E. E. & Maldonado-Ocampo, J. A. (2018). Lista de especies de peces de agua dulce de Colombia / Checklist of the freshwater fishes of Colombia. v2.10. Asociación Colombiana de Ictiólogos. <http://doi.org/10.15472/numrso>
- Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M. & Kanninen, M. (2011). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. Nature Geoscience, 4, 293-297.
- Dos Santos, D. & Reynaga, M. (2020). Aspectos métricos de la bioindicación. En E. Domínguez, A. Giorgi & N. Gómez (Comps.). La bioindicación en el monitoreo y evaluación de los sistemas fluviales de la Argentina: Bases para el análisis de la integridad ecológica. Editorial Eudeba. 158-174
- Duarte, L. O., Manjarrés-Martínez, L., De la Hoz-Maestre, J., Cuello, F., & Altamar, J. (2018). Estado de los principales recursos pesqueros de Colombia: Análisis de indicadores basados en tasas de captura, tallas de captura y madurez. Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca (AUNAP) & Universidad del Magdalena.
- Dudula, J. & Randhir, T. O. (2016). Modeling the influence of climate change on watershed systems: Adaptation through targeted practices. Journal of Hydrology, 541, 703-713. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.020>
- Eisfelder, C., Kuenzer, C. & Dech, S. (2012). Derivation of biomass information for semi-arid areas using remote-sensing data. International Journal of Remote Sensing, 33, 2937-2984.
- Emery, W. J. & Meincke, J. (1986). Global water masses: summary and review. Oceanological Acta, 9(4), 383-391.
- Empresa Colombiana de Carbón [Eccarbón]. (1995). Sistema de clasificación de recursos y reservas de carbón. <https://docs.upme.gov.co/SIMEC/simco/Cifras-Sectoriales/EstudiosPublicaciones/Sistema%20de%20clasificaci%C3%B3n%20de%20recursos%20y%20reservas%20de%20carb%C3%B3n%20281995%29.pdf>

- Erlandsson, M., Buffam, I., Fölster, J., Laudon, H., Temnerud, J., Weyhenmeyer, G. A. & Bishop, K. (2008). Thirty-five years of synchrony in the organic matter concentrations of Swedish rivers explained by variation in flow and sulphate. *Global Change Biology*, 14(5), 1191-1198. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01551.x>
- Eurie, M. & Goethals, P. (2020). Monitoring and assessment of aquatic ecosystems to support sustainable development. *Concept paper. Sustainability*, 12, 5603.
- Evans, C. D., Monteith, D. T., & Cooper, D. M. (2005). Long-term increases in surface water dissolved organic carbon: Observations, possible causes and environmental impacts. *Environmental Pollution*, 137(1), 55-71. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.12.031>
- Evans, C. D., Monteith, D. T. & Harriman, R. (2001). Long-term variability in the deposition of marine ions at west coast sites in the UK Acid Waters Monitoring Network: Impacts on surface water chemistry and significance for trend determination. *Science of the Total Environment*, 265(1-3), 115-129. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00653-7](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00653-7)
- Fahrig, L. (2003). Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 34, 487-515.
- Falkowski P., Barber R. & Smetacek V. (1998). Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. *Science* 281, 200-206.
- Ferreira, C. P. & Casatti, L. (2006). Integridade biótica de um córrego na bacia do Alto Rio Paraná avaliada por meio da comunidade de peixes. *Biota Neotropica*, 6, 1-25.
- Ferrero, M. A. (2004). Radar de apertura sintética: Fundamentos y aplicaciones ambientales. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).
- Fontúrbel F. E. & Barriga C. V. (2009). Una aproximación teórica al concepto de individuo. *Elementos*, 74, 45-52.
- Forman, R. T. & Godron, M. (1986). *Landscape ecology*. John Wiley & Sons.
- Fread, D. L. (1997). Dynamic Flood Routing with Explicit and Implicit Numerical Solution Schemes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(3), 166-173
- Freeman, M. C., Pringle, C.M. & Jackson, C. R. (2007). Hydrologic connectivity and the contribution of stream headwaters to ecological integrity at regional scales. *Journal of the American Water Resources Association*, 43, 5-14.
- Frery, A.C., Correa, A., Renn, C., Freitas, C., Jacobo-Berlles, J., Vasconcellos, L.P., Mejjail, M. & Sant'anna, S. (1999). Models for Synthetic Aperture Radar Image Analysis 1. *Resenhas IME-USP*, 4(1), 45-77.
- Frey, D. G. (1977). Biological integrity of water: An historical approach. En U.S. Environmental Protection Agency (Ed.), *The integrity of water* (pp. 127-140). U.S. Environmental Protection Agency.
- Fuentes Fernández, S. (2011). *Análisis de Correspondencias Simples y Múltiples*. Universidad Autónoma de Madrid. <https://www.fuenterrebollo.com/economicas/econometria/reducir-dimension/correspondencias/correspondencias.pdf>
- Galindo G., Espejo O. J., Rubiano J. C., Vergara L. K. & Cabrera E. (2014). Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia. V 2.0. Ideam.
- Galvis, G., y Mojica, J. I. (2007). The Magdalena River freshwater fishes and fisheries. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 10(2), 127-139. <https://doi.org/10.1080/14634980701351386>
- Gambini, M. J. (2006). *Modelos de Segmentación basados en Regiones y Contornos Activos aplicados a Imágenes de Radar de Apertura Sintética*. (Tesis doctoral). Universidad de Buenos Aires.
- Gao, Y., Gao, J., Chen, J., Xu, Y. & Zhao, J. (2011). Regionalizing aquatic ecosystems based on the river subbasin taxonomy concept and spatial clustering techniques. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(11), 4367-4385.
- García, J. M., Sarmiento, L. F., Salvador, M. & Porras, L. S. (2014). Uso de bioindicadores para la evaluación de la calidad del agua en ríos: aplicación en ríos tropicales de alta montaña. *Revisión corta. UGCiencia*, 23, 47-62.
- García-Alzate, C. A., Villegas-Acosta, P. A. & Román-Valencia, C. (2017). Análisis fisicoquímico y biológico del río Santo Domingo, afluente río Verde, cuenca del río La Vieja, Alto Cauca, Colombia. *Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural*, 21(1), 31-51. <https://doi.org/10.17151/bccm.2017.21.1.3>
- Gardner, R. C., Jones, T. A., Pritchard, D. E. & Stroud, D. A. (2018). Ramsar Advisory Missions: a mechanism to respond to change in ecological character of Ramsar Sites. *Ramsar Policy Brief*, 3. Ramsar Convention Secretariat. https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/rpb3_ramsar_advisory_missions_e.pdf

- Ghosh, S., Chatterjee, S., Shiva Prasad, G. & Pal, P. (2016). Effects of Climate Change on Aquatic Ecosystem and Production of Fisheries. En *Inland Waters - Dynamics and Ecology* (pp. 43-54). ISBN: 1839682949, 9781839682940.
- Gil, M., Soto, A., Usma, J. & Gutiérrez, O. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción + Limpia*, 7(2), 52-73
- Girvetz, E. H., Thorne, J. H., Berry, A. M. & Jaeger, J. A. (2008). Integration of landscape fragmentation analysis into regional planning: A statewide multi-scale case study from California, USA. *Landscape and Urban Planning*, 86, 205-218.
- Gitay, H., Bastow-Wilson, J. & Lee, W. G. (1996). Species redundancy: a redundant concept? *Journal of Ecology*, 84, 121-124.
- Goicoechea, P. (2002). Imputación basada en árboles de clasificación. Vitoria-Gasteiz, España: EUSTAT. https://www.eustat.eus/document/datos/ct_04_c.pdf
- Gómez, M. J., Martínez-Bueno, M. J., Lacorte, S., Fernández-Alba, A. R., & Agüera, A. (2007). Pilot survey monitoring pharmaceuticals and related compounds in a sewage treatment plant located on the Mediterranean coast. *Chemosphere*, 66(6), 993-1002. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.07.051>
- Gómez, N., Domínguez, E., Rodrigues, A. & Fernández, H. (2020). Los indicadores biológicos. En E. Domínguez, A. Giorgi, N. Gómez (Comps.). *La bioindicación en el monitoreo y evaluación de los sistemas fluviales de la Argentina: Bases para el análisis de la integridad ecológica*. Editorial Eudeba.
- Gómez D. M. y Barredo, J. (2005). *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la ordenación del territorio* (2.a ed.). Ra-Ma.
- Gómez-Fernández L. I. (2017). *Formulación del Plan Estratégico de la Macrocuenca Magdalena Cauca. Gestión Integral del Recurso Hídrico. Planificación de Cuencas Hidrográficas*. MinAmbiente
- Gómez-López, D. I., Navarrete Ramírez, S. M., Navas-Camacho, R., Díaz-Sánchez, C.M., Muñoz-Escobar, L. & Galeano, E. (2014). Protocolo Indicador Condición Tendencia Praderas de Pastos Marinos (ICTPM). Indicadores de monitoreo biológico del Subsistema de Áreas Marinas Protegidas (SAMP). Serie de Publicaciones Generales del Inveemar No. 68. Inveemar, GEF y PNUD. <http://www.inveemar.org.co/documentos/10182/14479/02+ProtocoloIndicadorPastosMarinosdigital.pdf/1686f1fe-4669-40bf-ab25-5468d656ad73>
- González del Tánago, M & García de Jalón, D. (2006). Attributes for assessing the environmental quality of riparian zones. *Limnetica*, 25(1), 389-402.
- Grau, J., Terraza, H., Rodríguez Velosa, D. M., Rihm, A., & Sturzenegger, G. (2015). Situación de la gestión de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. En A. Núñez. (Ed.). *Catálogos y Folletos del Banco Interamericano de Desarrollo*. <https://doi.org/10.18235/0006297>
- Gutiérrez, J. & Gould, M. (2000). *SIG: Sistemas de Información Geográfica*. Editorial Síntesis.
- Gutiérrez-Bonilla, F. de P., & Álvarez-León, R. (2011). Los ciclidos (Pisces: Cichlidae) en Colombia: introducciones, trasplantes y repoblaciones. *Luna Azul*, 33, 154-177 <https://revistasoj.s.ucaldas.edu.co/index.php/lunazul/article/view/1270>
- Harris, J. H. (1995). The use of fish in ecological assessments. *Australian Journal of Ecology* 20(1), 65-80.
- Henao, A.M. (1987). El disco Secchi y el estado trófico. *Ainsa* 7(1), 67-79
- Hernández, M. E. (2009). Suelos de humedales como sumideros de carbono y fuentes de metano. *Terra Latinoamericana*, 28, 139-147.
- Hilker, T., Coops, N. C., Nestic, Z., Wulder, M. A., & Black, A. T. (2007). Instrumentation and approach for unattended year round tower based measurements of spectral reflectance. *Computers and Electronics in Agriculture*, 56(1), 72-84. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.01.003>.
- Holyoak, M., Leibold, M. A. & Holt, R. D. (2005). *Metacommunities: spatial dynamics and ecological communities*. University of Chicago Press.
- Hondzo, M. & Stefan, H. G. (1993). Regional water temperature characteristics of lakes subjected to climate change. *Climatic Change*, 24(3), 187-211. <https://doi.org/10.1007/BF01091829>
- Hooper, D.U., Chapin, S., Ewel, J. J., Héctor, A., Inchausti, P., Lavorel, S., Lawton, J. H., Lodge, D. M., Loreau, M., Naeem, S., Schmid, B., Setälä, B., Symstad, A. J., Vandermeer, J., Wardle, D. A. (2005). Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological Monographs*, 75(1), 3-35. <https://doi.org/10.1890/04-0922>
- Hopewell, J., Dvorak, R. & Kosior, E., 2009. Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 364, 2115-2126.
- Howard, J., Sutton-Grier, A., Herr, D., Kleypas, J., Landis, E., Mcleod, E., Pidgeon E. & Simpson, S., (2017). Clarifying the role of coastal and marine systems in climate mitigation. *Frontiers in Ecology and the Environment* 15(1), 42-50. <https://doi.org/10.1002/fee.1451>

- Ibrahim, A., Mabuchi, Y., & Murakami, M. (2009). Remote sensing algorithms for monitoring eutrophication in Ishizuchi storm water reservoir in Kochi Prefecture, Japan. *Hydrological Sciences Journal*, 50, 525-542. <https://doi.org/10.1623/hysj.50.3.525.65024>
- Ilorme, F., Griffis, V. W. (2013). A novel procedure for delineation of hydrologically homogeneous regions and the classification of ungauged sites for design flood estimation. *Journal of Hydrology*, 492, 151-162. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.045>
- Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2021). Censo Pecuario Nacional. <https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2021) Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono. Cambio de la Superficie Cubierta por Bosque Natural (Desagregación). <http://smbyc.ideam.gov.co/MonitoreoBC-WEB/reg/indexLogOn.jsp>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2021a). Cubo de Datos de Colombia (Colombia Data Cube) [Conjunto de datos]. IDEAM, CSIRO, CEOS & Google Earth Engine. <https://www.opendatacube.org>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2021b). Metodología de la operación estadística "Balance de masa glaciar". Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental. <http://www.ideam.gov.co/documents/11769/116508509/M-GCI-M029+METODOL+OG%C3%8DA+DE+LA+OPERACI%C3%93N+ESTAD%C3%8D+STICA+BALANCE+DE+MASA+GLACIAR.pdf/7165aaff-ae72-486c-8c38-dc04c8dd6b4c>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2019). Aproximación técnica y conceptual para el monitoreo y seguimiento del estado de los ecosistemas acuáticos. Fase I: Proceso de construcción del Protocolo de Monitoreo y Seguimiento del Estado de los Ecosistemas Acuáticos del país, con énfasis en la definición de indicadores hidrobiológicos, físicos y socioeconómicos.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2019a). Estudio Nacional del Agua 2018. http://www.ideam.gov.co/web/agua/estudio-nacional-del-agua/-/document_library_display/hWSQikoLFPPrw/view/125678471
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2019b). Protocolo para la identificación y Evaluación de la Degradación de Suelos por Desertificación.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2019c). Estudio Nacional de la Degradación de Suelos por Salinización.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2019d). Informe Nacional de Residuos o Desechos Peligrosos en Colombia.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2018). Hoja metodológica del indicador "Cambio de Superficie Glaciar" (Versión 1.00). 8p. http://www.ideam.gov.co/documents/24155/123679/41-4.19_HM_Cambio_superficie_glaciar_3_FI.pdf/ee30441d-1f35-4c67-8aaa-1269e48c4295
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2018a). Capa geográfica de coberturas de la Tierra, leyenda Corine Land Cover a escala 1 : 100.000, período 2018, formato shapefile. <http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2018c). Protocolo de monitoreo del agua. Bogotá. <https://www.ideam.gov.co/sala-de-prensa/informes/Protocolos%20y%20procedimientos%20del%20agua>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2017). Mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos, escala 1 : 100.000. <https://www.ideam.gov.co/ecosistemas>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2016). Programa Nacional de Monitoreo de Recurso Hídrico. Ideam. <https://www.ideam.gov.co/sala-de-prensa/informes/Protocolos%20y%20procedimientos%20del%20agua>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2016a). Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal - Escala 1 : 100.000. Ideam. <http://www.ideam.gov.co/documents/13257/14369/PROTOCOLO+INCENDIOS+4Oct.pdf>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2014). Capa geográfica de clima Caldas - Lang a escala 1 : 100.000, formato shapefile. Ideam. <http://www.ideam.gov.co/capas-geo>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2013a). Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia. Ideam. https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/prensa/boletines/2024-08-23/zonificacion_y_codificacion_de_unidades_hidrograficas_e_hidrogeologicas_de_colombia.pdf

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2013b). Guía metodológica para la elaboración de mapas geomorfológicos a escala 1 : 100.000. Ideam. http://www.ideam.gov.co/documents/11769/152722/Guia_Enero_201401*%281%29.pdf
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2011). Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia, Nivel Subnacional Escala Gruesa y Fina. Ideam.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2011a). Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal - Escala 1 : 100.000.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2010). Sistemas Morfogénicos del Territorio Colombiano. Ideam. https://www.researchgate.net/publication/390542632_instituto_de_hidrologia_meteorologia_y_estudios_ambientales_ideam_sistemas_morfogenicos_del_territorio_colombiano
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2010a). Leyenda nacional de coberturas Corine Land Cover a escala 1 : 1 00.000. Ideam. https://www.corpocesar.gov.co/files/Ref_UnicoyPersistente/Corine_Land_Cover.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2004). Informe anual sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales renovables en Colombia. Ideam.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam], Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca [CAR] y Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales [UDCA]. (2017d). Protocolo para la identificación y Evaluación de la Degradación de Suelos por Salinización. <http://hdl.handle.net/20.500.11786/33672>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam] e Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés [Invemar]. (2017). Protocolo de Monitoreo del Agua.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam], Fundación Natura y Condesan. (2021). Memorias Taller Internacional sobre experiencias en monitoreo y seguimiento de ecosistemas acuáticos.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam], Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt [Instituto Humboldt], Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés [Invemar] e Instituto Geográfico Agustín Codazzi [Igc]. (2020). Memoria técnica. Mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia (MEC), escala 1 : 100.000.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam], Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS] y Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales [UDCA] (2015). Protocolo para la Identificación y Evaluación de la Degradación de Suelos por Erosión.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam], Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS], Dirección Nacional de Planeación [DNPI], Cancillería. (2017a). Tercera Comunicación Nacional de Colombia a La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC).
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam] y Unidad de Planeación Minero Energética [Upme]. (2017). Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia.
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt [Instituto Humboldt]. (2014). Marco conceptual y metodológico para la construcción del mapa de humedales de Colombia a escala 1 : 100.000.
- Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés [Invemar]. (2017). Informe del estado de las basuras marinas en Colombia. Santa Marta: Invemar, Serie de Publicaciones Periódicas No. 23.
- Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés [Invemar]. (2019). Informe del estado de los ambientes marinos y costeros en Colombia, 2019. Santa Marta: Invemar, Serie de Publicaciones Periódicas No. 26.
- Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés [Invemar]. (2021). Informe del estado de los ambientes y recursos marinos y costeros en Colombia, 2020. Serie de Publicaciones Periódicas.
- Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés [Invemar]. (2020). Informe del estado de los ambientes y recursos marinos y costeros en Colombia, 2019. Serie de Publicaciones Periódicas.

- Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés [Invemar]. (2013). Mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos a escala 1 : 100.000: marco conceptual y metodológico.
- Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés [Invemar]. (2006). Informe del estado de los ambientes marinos y costeros en Colombia, 2006. Serie de Publicaciones Periódicas No. 8
- Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés [Invemar]. (1994-2011). Índice de integridad ecológica para corales (IIEC). Sistema de Información Ambiental Marina de Colombia (SIAM). <https://siam.invemar.org.co>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [Igac]. (2021). Metodología para la clasificación de las tierras por su capacidad de uso (3ª ed.). Subdirección Agrológica. https://www.igac.gov.co/sites/default/files/listadomaestro/in-gag-pc05-02-clasificacion_de_las_tierras_por_su_capacidad_de_uso.pdf
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [Igac]. (2020). Sistema de clasificación geomorfológica aplicado a los levantamientos de suelos.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [Igac]. (2018). Mapa de Carbono Orgánico de Suelos de Colombia. Igac
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [Igac]. (2017). Capa vectorial de suelos a escala 1 : 100.000. <https://geportal.igac.gov.co/contenido/agrologia-consulta>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [Igac]. (2015). Levantamiento Semidetallado suelos en las áreas de influencia de los humedales de Colombia (Región Caribe). Igac.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [Igac]. (2014). Mapa de suelos Colombia (Geopedología).
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [Igac]. (2014b). Metodología para la clasificación de las tierras por su capacidad de uso. Grupo interno de trabajo levantamiento de suelos.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [Igac]. (2007a). Manual de normas y especificaciones técnicas para los levantamientos edafológicos.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [Igac]. (2007b). Catálogo de términos de los recursos de tierras y relacionados.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [Igac]. (2006). Métodos analíticos del Laboratorio de Suelos (análogo).
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [Igac]. (2001). Cartografía Base Escala 1 : 100.000.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi [Igac], Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena [Cormagdalena], Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2008). Mapa de cobertura de la tierra cuenca Magdalena-Cauca: Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia. Escala 1:100.000.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014a). 2013 supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Wetlands (T. Hiraishi, T. Krug, K. Tanabe, N. Srivastava, J. Baasansuren, M. Fukuda, & T. G. Troxler, Eds.). IPCC. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/wetlands>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014b). Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, et al., Eds.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415379>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley, Eds.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories (H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, & K. Tanabe, Eds.). Institute for Global Environmental Strategies. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 4: Agriculture, forestry and other land use (H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, & K. Tanabe, Eds.). Institute for Global Environmental Strategies. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2000). Land use, land-use change, and forestry: Special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (R. T. Watson, I. R. Noble, B. Bolin, N. H. Ravindranath, D. J. Verardo, & D. J. Dokken, Eds.). Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/land-use-land-use-change-and-forestry/>

- Inubushi, K., Otake, S., Furukawa, Y., Shibasaki, N., Ali, M., Itang, A. M. & Tsuruta, H. (2005). Factors influencing methane emission from peat soils: Comparison of tropical and temperate wetlands. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 71(1), 93-99. <https://doi.org/10.1007/s10705-004-5283-8>
- Jabbar, F. K., Grote, K., & Tucker, R. E. (2019). A novel approach for assessing watershed susceptibility using weighted overlay and analytical hierarchy process (AHP) methodology: a case study in Eagle Creek Watershed, USA. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(31), 31981-31997. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11356-019-06355-9.pdf>
- Jaeger, J. A. (2000). Landscape division, splitting index, and effective mesh size: New measures of landscape fragmentation. *Landscape Ecology*, 15, 115-130.
- Jager, H. & Smith, J. (2008). Sustainable reservoir operation: can we generate hydropower and preserve ecosystem values? *River Research and Applications*, 24(3), 340-352. <https://doi.org/10.1002/rra.1069>
- Jaramillo, A. (2009). Estudio de la biología trófica de cinco especies de peces bentónicos de la costa de Cullera: relaciones con la acumulación de metales pesados. (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia.
- Jaramillo, J. (2002). Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales: Una solución para la disposición final de residuos sólidos municipales en pequeñas poblaciones. División de Salud y Medio Ambiente. Programa de Salud Ambiental, Organización Panamericana de la Salud. Serie Técnica 28. <https://redrrs.minam.gob.pe/material/20090128200240.pdf>
- Jiménez, C. (2011). Contaminantes orgánicos emergentes en el ambiente: productos farmacéuticos. *Revista Lasallista de Investigación*, 8(2), 143-153
- Jiménez-Segura, L. F., Galvis-Vergara, G., Cala-Cala, P., García-Alzate, C. A., López-Casas, S., Ríos-Pulgarín, M. I., Arango, G. A., Mancera-Rodríguez, N. J., Gutiérrez-Bonilla, F., & Álvarez-León, R. (2016). Freshwater fish faunas, habitats and conservation challenges in the Caribbean river basins of north-western South America. *Journal of Fish Biology*, 89(1), 65-101. <https://doi.org/10.1111/jfb.13018>
- Junk, W. J. (1982). Amazonian floodplains: Their ecology, present and potential use. *Proceedings of the International Scientific Workshop on Ecosystem Dynamics. In Freshwater Wetlands and Shallow Water Bodies*, pp. 98-126. United Nation Environment Program (UNEP).
- Junk, W. J. & Piedade, M.T. (2004). Status of knowledge, ongoing research, and research needs in Amazonian wetlands. *Wetlands Ecology and Management*, 12, 597-609.
- Junk, W. J., & Wantsem, K. M. (2004). The flood pulse concept: New aspects, approaches and applications. En: *Symposium on the management of large rivers for fisheries. Volume 2* (p. 117).
- Junk, W. J., Bailey, P. B. & Sparks, R. E. (1989). The flood pulse concept in river-floodplain systems. In Dodge, D. P. (Ed), *Proceedings of the International Large River Symposium*, pp 110-127. Department of Fisheries and Oceans, Ontario Ministry of Natural Resources Fisheries Branch.
- Karr, J. R. (1981). Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries*, 6(6), 21-27.
- Kauffman, J. B., Donato, D. C. & Adame, M. F. (2013). Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono de los manglares. Documento de Trabajo 117. Center for International Forestry Research (Cifor)
- Kernan, M., Battarbee, R. W. & Moss, B. (2010). *Climate Change Impacts on Freshwater Ecosystems*. In *Climate Change Impacts on Freshwater Ecosystems*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781444327397>
- Kirk, G. J. D. (2004). *The biogeochemistry of submerged soils*. Wiley.
- Kovač Viršek, M., Palatinus, A., Koren, Š., Peterlin, M., Horvat, P. & Kržan, A. (2016). Protocol for Microplastics Sampling on the Sea Surface and Sample Analysis. *Journal of Visualized Experiments*, 118. <https://doi.org/10.3791/55161>
- Krebs, C. J. (2008). *The Ecological World View*. CSRO Publishing.
- Krebs, C. J. (1985). *Ecología: estudio de la distribución y la abundancia*. (2.a ed.). Harla.
- Lafayette, W., Stefan, H. & Fang, X. (1998). Simulated climate change effects on year-round water temperatures in temperate zone lakes. *Climatic Change*, 40, 547-576.
- Lamprecht, H. (1990). *Silvicultura en los Trópicos*. GTZ.
- Lasso, C. A., E. Agudelo Córdoba, L. F. Jiménez-Segura, H. Ramírez-Gil, M. Morales-Betancourt, R. E. Ajiaco-Martínez, F. de Paula Gutiérrez, J. S. Usma Oviedo, S. E. Muñoz Torres y A. I. Sanabria Ochoa (Editores). (2011). *I. Catálogo de los recursos pesqueros continentales de Colombia. Serie Editorial Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros Continentales de Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). 715 pp.
- Leibold, M. A., Holyoak, M., Mouquet, N., Amarasekare, P., Chase, J. M., Hoopes, M. F., Holt, R. D., Shurin, J. B., Law, R., Tilman, D., Loreau, M. & González, A. (2004). The metacommunity concept: a framework for multi-scale community ecology. *Ecology Letters*, 7, 601-613.

- León, J. G. & Rojas, M. (2020). Estimación de flujos difusivos de CO₂ en embalses tropicales mediante el uso conjunto de la teledetección, la modelación de concentraciones superficiales del gas y K600. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 11(2), 2145-6453.
- Lerdo de Tejada Pavón, M. F. (2014). Estimación de datos faltantes con el algoritmo EM (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México. <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000708980>
- Little, R. J. A., & Rubin, D. B. (2002). *Statistical analysis with missing data* (2^a ed.). New York: John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119013563>
- Livingstone, D. M. (2000). Large-scale climatic forcing detected in historical observations of lake ice break-up. *Verhandlungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, 27, 2775-2783.
- Livingstone, D. M. (1997). Break-up dates of Alpine lakes as proxy data for local and regional mean surface air temperatures. *Climatic Change*, 37(2), 407-439. <https://doi.org/10.1023/A:1005371925924>
- Loccisano, S. (1996). Segmentación en imágenes de radar de apertura sintética (SAR) multibanda. Tesis. Universidad de Buenos Aires. <https://gestion.dc.uba.ar/media/academic/grade/thesis/loccisano.pdf>
- Long, J., Trisalyn, N. & Wulder, M. (2010). Regionalization of landscape pattern indices using multivariate cluster analysis. *Environmental Management*, 46, 134-142.
- Lyons, J., Navarro-Perez, S., Cochran, P.A., Santana, E. & Guzman-Arroyo, M. (1995). Index of biotic integrity based on fish assemblages for the conservation of streams and rivers in west-central Mexico. *Conservation Biology*, 9, 569-584.
- Madden, C. J., Goodin, K., Allee, R., Bamford, D. & Finkbeiner, M. (2008). Clasificación ecológica estandarizada costera y marina, versión III: La clasificación de referencia para hábitats marinos para la red temática de ecosistemas IABIN. NatureServe-National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).
- Magurran, A. E. (2008). Diversity over time. *Folia Geobotanica*, 43, 317-329.
- Maldonado, I., Hernández, M., Clavijo, J. & Reyes, G. (1998). Geología de la Plancha 25 Fundación. Escala 1:100.000. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras (Ingeominas).
- Maldonado, J. A., DoNascimento, C., Oviedo, U., Saulo, J., Collazos, E. & García, J. (2019). Biodiversidad de los peces de agua dulce en Colombia. Instituto Humboldt, Conservación Internacional Colombia, WWF.
- Marcano, A., Cartaya, S., Pacheco, H., & Méndez, W. (2015). Estimación de pesos ponderados de variables para generar mapas de susceptibilidad a movimientos en masa a través de la Evaluación Espacial Multicriterio. *Terra*, 31(50), 55-80 http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S1012-70892015000200004&script=sci_abstract
- Margalef, R. (1983). *Ecología*. (4.a ed.). Planeta.
- Margalef, R. (1983a). *Limnología*. Ediciones Omega, S.A.
- Márquez, G., & Guillot, G. (2001). *Ecología y efecto ambiental de embalses: aproximación con casos colombianos* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia. Serie de Publicaciones del Posgrado en Gestión Ambiental. Bogotá, Colombia.
- Martin, M. (2002). Técnicas clásicas de segmentación de imagen. <https://www.kramirez.net/Robotica/Material/Presentaciones/segmenclasica.pdf>
- Marull, J., Pino, J., Mallarach, J. M. & Cordobilla, M. J. (2007). A land suitability index for strategic environmental assessment in metropolitan areas. *Landscape and Urban Planning*, 81, 200-212.
- Matthews, A. M., Duncan, A. G. & Davison, R. G. (2001). An assessment of validation techniques for estimating chlorophyll a concentration from airborne multispectral imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 22(2-3), 429-448.
- Mayer, A., Winkler, R. & Fry, L. (2014). Classification of watersheds into integrated social and biophysical indicators with clustering analysis. *Ecological Indicators*, 45, 340-349. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.04.030>
- Mazorra, A., Ricaurte, L. F., Méndez, O., Ocampo, R., Infante, C. G. & Argüelles J. H. (2000). El manejo de la información en el Instituto Sinchi. *Boletín Interno*, 2. Área de Sistemas de Información del Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas.
- McCormick, F. H., Hughes, R. M., Kaufmann, P. R., Peck, D. V., Stoddard, J. L., & Herlihy, A. T. (2001). Development of an index of biotic integrity for the Mid-Atlantic Highlands region. *Transactions of the American Fisheries Society*, 130(5), 857-877.
- McDonnell, J. J. & Woods, R. (2004). On the need for catchment classification. *Journal of Hydrology*, 299(1-2), 2-3. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(04\)00421-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(04)00421-4)
- McFeeters, S. K. (2007). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432.

- McGarigal, K., & Marks, B. J. (1995). FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure (General Technical Report PNW-GTR-351). United States Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. <https://doi.org/10.2737/PNW-GTR-351>
- McGill, B.J., Enquist, B.J., Weiher, E. & Westoby, M. (2006). Rebuilding community ecology from functional traits. *Trends in Ecology and Evolution*, 21, 178-185.
- McMahon, G., Wiken, E. B. & Gauthier, D. A. (2004). Toward a scientifically rigorous basis for developing mapped ecological regions. *Environmental Management*, 34(1), 111-124.
- Meerhoff, M., Mazzeo, N., Moss B. & Rodriguez-Gallego, L. (2003). The structuring role of free-floating vs. submerged plants in a subtropical shallow lake. *Aquatic Ecology*, 37, 377-391.
- Meisel-Roca, A. & Pérez, J. (2006). Geografía física y poblamiento en la costa Caribe colombiana. Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional. Banco de la República-Sucursal Cartagena.
- Méndez, C., & Rondón, M. (2012). Introducción al Análisis Factorial Exploratorio. Metodología de la investigación y lectura crítica de estudios. *Revista Colombiana de Psiquiatría*, 41(1), 197-207
- Mendoza-Cariño, M., Quevedo-Nolasco, A., Bravo-Vinaja, A., Flores-Magdaleno, H., De La Isla-De Bauer, M., Gavi-Reyes, F. & Zamora-Morales, B. (2014). Estado ecológico de ríos y vegetación ribereña en el contexto de la nueva ley general de aguas de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30(4), 429-436.
- Mesa, L. M., Corzo, G., Hernández-Manrique, O. L., Lasso, C. A., y Galvis, G. (2016). Ecorregiones dulceacuícolas de Colombia: una propuesta para la planificación territorial de la región trasandina y parte de las cuencas del Orinoco y Amazonas. *Biota Colombiana*, 17(2), 62-88.
- Meybeck, M., Kuusisto, E., Mäkelä, A. & Mälkki, E. (2002). Water Quality. In R. Ballance & J. Bartram (Eds). *Water quality monitoring: a practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programmes* (pp. 15-36). CRC Press.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MinAmbiente]. (2000). Política nacional ambiental para el desarrollo sostenible de los espacios oceánicos y las zonas costeras e insulares de Colombia. Dirección General de Ecosistemas del Ministerio del Medio Ambiente.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [MAVDT]. (2010). Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [MAVDT]. (2009). Lineamientos Técnicos para el Manejo de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MinAmbiente]. (2022). Programa de Nacional de Monitoreo de Humedales de Colombia [manuscrito en borrador].
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MinAmbiente]. (2021). Mapa de Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCAS) [Capa cartográfica en línea]. Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MinAmbiente]. (2020). Programa Nacional de Monitoreo de Ecosistemas (PNMEC). Documento en construcción.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MinAmbiente]. (2017). Resolución No. 646 de 2017. Formulación de lineamientos, medidas de conservación, manejo y uso de ecosistemas marinos y costeros, con la intención de apoyar acciones de fortalecimiento en la gestión ambiental de las zonas costeras de Colombia.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MinAmbiente]. (2016). Política para la gestión sostenible del suelo.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MinAmbiente]. (2014). Criterios para la priorización de cuencas hidrográficas objeto de Ordenación y Manejo. Dirección de gestión integral del recurso hídrico.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MinAmbiente]. (2014). Guía Técnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MinAmbiente]. (2012). Colombia, 20 años siguiendo la Agenda 21. J. M. Sandoval & J. P. Liévano (Eds.). MinAmbiente. https://archivo.minambiente.gov.co/images/asuntos-internacionales/pdf/colombia-20-años-siguiendo-la-agenda-21/040512_balance_agenda_21.pdf
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MinAmbiente] y Convención Ramsar. (2018). Capa geográfica de los humedales Ramsar de Colombia. <http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas>
- Ministerio de Minas y Energía [MME], Unidad de Planeación Minero Energético [UPME] & Universidad de Córdoba. (2015). Incidencia real de la minería del carbón, del oro y del uso del mercurio en la calidad ambiental con énfasis especial en el recurso hídrico - diseño de herramientas para la planeación sectorial.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio [MVCT]. (2014). Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos. Bogotá.

- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino [MARM]. (2010). Sostenibilidad en España 2010. Madrid, España: Observatorio de la Sostenibilidad en España.
- Ministerio del Interior (MinInterior). (s.f.). Día internacional de los pueblos indígenas. <https://www.mininterior.gov.co/dia-internacional-de-los-pueblos-indigenas/>
- Mitsch, W. J. & Gosselink, J. G. (2000). Wetlands (3.a ed.). John Wiley and Sons.
- Mojica, J. I., Usma, J. S., Álvarez-León, R., & Lasso, C. A. (2012). Libro rojo de peces dulceacuicolas de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, WWF Colombia y Universidad de Manizales. https://awsassets.panda.org/downloads/libro_rojo_peces_dulceacuicolas_de_colombia__dic_2012.pdf
- Molano, B. J. (1998). Biogeografía de la Orinoquia Colombiana. In C. Domínguez (Ed.), Colombia Orinoco (pp. 96-101). Fondo FEN.
- Montealegre, J. E. (2007). Modelo institucional del Ideam sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia. Ideam.
- Montoya, J., Castillo, M. & Sánchez, L. (2011). La importancia de las inundaciones periódicas para el funcionamiento y conservación de los ecosistemas inundables de grandes ríos tropicales: estudios en la cuenca del Orinoco. *Interciencia*, 36(12), 900-907
- Moore, T. R. & Knowles, R. (1989). The influence of water table levels on methane and carbon dioxide emissions from peatland soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 69(1), 33-38. <https://doi.org/10.4141/cjss89-004>
- Morello, J., Rodríguez, A. F., Silva, M. E., Mendoza, N. E. & Matteucci, S. D. (2007). Metodología para la clasificación de ambientes en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas, Argentina. *Revista Fronteras*, 6, 37-40.
- Moser, B., Jaeger, J. A., Tappeiner, U., Tasser, E. & Eiselt, B. (2007). Modification of the effective mesh size for measuring landscape fragmentation to solve the boundary problem. *Landscape Ecology*, 22, 447-459.
- Moya, N., Tomanova, S. & Oberdorff, T. (2007). Initial development of a multi-metric index based on aquatic macroinvertebrates to assess streams condition in the Upper Isiboro-Sécure Basin, Bolivian Amazon. *Hydrobiologia*, 589(1), 107-116.
- Muciño Márquez, R. E. (2010). Variación estacional de la comunidad fitoplanctónica en granjas atuneras en la Bahía de La Paz, Baja California Sur [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas]. La Paz, Baja California Sur, México.
- Myers, N. (1988). Threatened biotas: hot spots in tropical forests. *Environmentalist*, 8(3), 187-208.
- Naranjo, G. L., Andrade I. G. & Ponce de León, E. (1999). Humedales Interiores de Colombia. Universidad Javeriana.
- National Aeronautics and Space Administration [NASA]. (2014). Landsat 7 Science Data Users Handbook. NASA
- National Aeronautics and Space Administration [NASA], United States Geological Survey [USGS], & European Space Agency [ESA]. (Año). Modelo digital de elevación (MDE) [Datos ráster]. (2013). Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global [Modelo digital de elevación]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC). <https://doi.org/10.5067/MEaSURES/SRTM/SRTMGL1.003>
- Natural Resources Canada. (2014). Fundamentals of remote sensing (7th ed.). Natural Resources Canada. https://natural-resources.canada.ca/sites/nrcan/files/earthsciences/pdf/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_e.pdf
- Navarrete-Ramírez, S. M. (2014). Protocolo Indicador Variación línea de costa: perfiles de playa. Indicadores de monitoreo biológico del Subsistema de Áreas Marinas Protegidas (SAMP). Invemar, GEF y PNUD.
- Navarrete-Ramírez, S. M. & Rodríguez-Rincón, A. M. (2014a). Protocolo Indicador Condición Tendencia Bosques de Manglar (ICTBM). Indicadores de monitoreo biológico del Subsistema de Áreas Marinas Protegidas (SAMP). Invemar, GEF y PNUD. <http://www.invemar.org.co/documents/10182/14479/03+ProtocoloIndicadorBosquesdeManglardigital.pdf/215dd659-4cc6-49f4-8771-2c58ae-5f18cf>
- Neill, C., Cerri, C., Melillo, J., Feigl, B., Steudler, P., Moraes, J., & Piccolo, M. (1998). Stocks and dynamics of soil carbon following deforestation for pasture in Rondônia. In M. V. Ballester & C. A. Nobre (Eds.), Amazonia and global change (pp. 9-28). CRC Press. [https://doi.org/10.1201/9780203739273-2Neira_F._Turriago_J._D._Berrio_V._\(2017\).](https://doi.org/10.1201/9780203739273-2Neira_F._Turriago_J._D._Berrio_V._(2017).)
- Ng, R. & Han, J. (2002). Clarans: "a method for clustering objects for spatial data mining". *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 14, 1003-1016.
- Noble, B. (2004). Strategic environmental assessment quality assurance: evaluating and improving the consistency of judgments in assessment panels. *Environmental Impact Assessment Review*, 24(1), 3-25. [https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(03\)00118-5](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(03)00118-5).

- Noon, B. R. (2003). Conceptual issues in monitoring ecological resources. En D. E. Busch & J. C. Trexler (Eds.), *Monitoring Ecosystems: Interdisciplinary Approaches for Evaluating Ecoregional Initiatives* (pp. 27-71). Island Press.
- Núñez-Avellaneda, M. & Duque, S. R. (2001). Fitoplancton de algunos ríos y lagos de la Amazonía colombiana. En C. Franky & C. Zárate (Eds.), *Imani mundo: Estudios en la Amazonía colombiana* (pp. 305-335). Unibiblos.
- Odum, E. P. & Warret, G. W. (2006). *Fundamentos de ecología* (5.a ed.). International Thomson Editores.
- Oficina de las Naciones Unidas Contra la Droga y el Delito [UNODC]. (2020). *Explotación de oro de aluvión. Evidencias a partir de percepción remota 2019*.
- Olarte Villanueva, C. P., Merchán López, O. F., Linares Prieta, R., Quintero Cardozo, F., León Cruz, R., Rodríguez León, A., Fonseca G., S. C. & Montenegro, J. O. (2020). *Marco rector para la implementación del Inventario Forestal Nacional*. Ideam.
- Olaya, V. (2012). *Sistemas de información geográfica: Tomo I (Versión 1.0)* [Libro electrónico]. Autopublicado. <https://volaya.github.io/libro-sig/>.
- Omernik, J.M. (1987). Ecoregions of the conterminous United States (Map Supplement). *Annals of the Association of American Geographers*, 77(1), 118-125.
- Ordóñez, L. & González, R. (2016). Primera aproximación a una propuesta de conectividad entre los humedales interiores Santa María del Lago, Córdoba y Juan Amarillo y los demás elementos de la estructura ecológica principal en la cuenca urbana del río Salitre, Bogotá D.C. (Trabajo de grado). Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD]. (2003). *OECD Environmental Indicators*. In *OECD Environmental Indicators*, 25. OECD. <https://doi.org/10.1787/9789264193499-en>
- Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD]. (2001). *Using the Pressure-State-Response Model To Develop Indicators of Sustainability*. OECD.
- Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (2005). *Evaluación de los Ecosistemas del Milenio [EEM]. Informe de Síntesis*. <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.439.aspx.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2019). *Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems: Guidelines for assessment (Version 1)*. *Livestock Environmental Assessment and Performance (LEAP) Partnership*. FAO. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca2934en>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2018). *Global Soil Organic Carbon Map (GSOCmap)*. FAO. <http://www.fao.org/global-soil-partnership/pillars-action/4-information-and-data-new/global-soil-organic-carbon-gsoc-map>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2017). *Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto*. FAO. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6e5e1fa9-ef55-4198-9160-fa580483f991/content>
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [Unesco]. (2009). S. Bonilla (Ed.), *Cianobacterias Planctónicas del Uruguay, Manual para la identificación y medidas de gestión*. Documento Técnico PHI-LAC, 16. <http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002163/216319s.pdf>
- Organización Internacional de Maderas Tropicales [OIMT], Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge [CVSJ], Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal [CONIF] & Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [MAVDT]. (2005). *Plan de manejo integral de los manglares de la zona de uso sostenible del sector estuarino de la bahía de Cispatá, departamento de Córdoba-Colombia*. Bogotá.
- Otero, J. C., Garay, A., y Ramírez, F. H. (2008). *Plan de Ordenamiento de la Unidad de Gestión de Ecosistemas de la Zona de Influencia del Proyecto Hidroeléctrico El Chivor (Boyacá, Colombia)*. Conservación Internacional Colombia.
- Pabón J. D. (2011). *El cambio climático en la región de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca*. Universidad Nacional de Colombia - Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.
- Pal, A., Gin, K. Y.-H., Lin, A. Y.-C., & Reinhard, M. (2010). Impacts of emerging organic contaminants on freshwater resources: Review of recent occurrences, sources, fate and effects. *Science of the Total Environment*, 408(24), 6062-6069. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.09.026>
- Palau, A., Alonso, M. & Corregidor, D. (2009). *Análisis del ciclo de carbono en embalses y su posible efecto en el cambio climático. Aplicación al embalse de Susqueda (río Ter, España)*. Fundación para el Fomento de la Ingeniería del Agua.
- Palacio, H., Ramírez, J., Echenique, R., Palacio, J. & Sant'Anna, C. (2015). Floristic composition of cyanobacteria in a neotropical, eutrophic reservoir. *Brazilian Journal of Botany*, 38, 865-876. <https://doi.org/10.1007/s40415-015-0185-3>

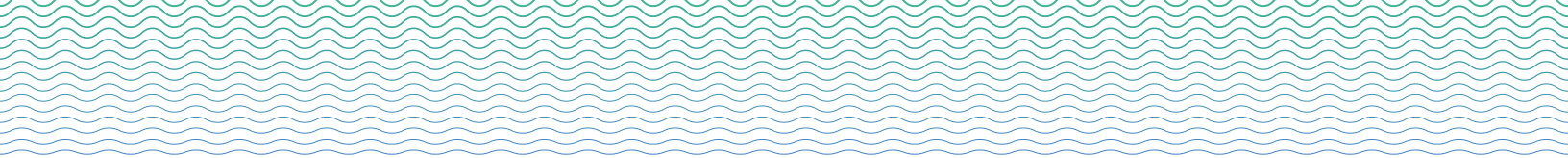
- Parques Nacionales Naturales (PNN). (2021). Sistema Nacional de Áreas Protegidas. <https://www.parquesnacionales.gov.co/portal/es/sistema-nacional-de-areas-protectidas-sinap/>
- Parques Nacionales Naturales (PNN) e Ideam. (2020). Convenio Interadministrativo No. 002 de 2020. Documento interno, Bogotá, Colombia.
- Patiño, Y., Díaz, E., & Ordóñez, S. (2014). Microcontaminantes emergentes en aguas: Tipos y sistemas de tratamiento. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 5(2), 1–20. <https://www.redalyc.org/pdf/3236/323631115001.pdf>
- Pearson, L. and Langridge, J. (2008) 'Climate change vulnerability assessment: Review of agricultural productivity' CSIRO Climate Adaptation Flagship Working paper No.1. Web-ref <http://www.csiro.au/resources/CAF-Working-Papers>
- Pinilla, G. (2016). Algunas experiencias en el uso de índices limnológicos en Colombia. *Acta biológica. Colombiana.*, 21(1), 241-248. Universidad Nacional de Colombia.
- Pinilla, G. (2017). Prácticas de limnología. Guías de laboratorio y campo. Universidad Nacional de Colombia.
- Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas (IPBES). (2019). Díaz, S., Settele, J., Brondizio, E. S., Ngo, H. T., Guèze, M., Agard, J., Arneth, A., Balvanera, P., Brauman, K. A., Butchart, S. H. M., Chan, K. M. A., Garibaldi, L. A., Ichii, K., Liu, J., Subramanian, S. M., Midgley, G. F., Miloslavich, P., Molnár, Z., Obura, D., ... Zayas, C. N. (Eds.). Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services. IPBES Secretariat. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3553579>.
- Polanco, C. (2006). Indicadores ambientales y modelos internacionales para toma de decisiones. *Gestión y Ambiente*, 9(2), 27-41.
- Polanco A. & Acero A. (2019). Colombia país de peces: Biodiversidad de peces marinos de del Caribe Colombiano. En *La pesca en Colombia: del agua a la mesa* (1.a ed.) (pp. 19-22). Agenda del Mar.
- Posada, B. O., Morales-G., D. & Henao P., W. (2011). Diagnóstico de la erosión costera del territorio insular colombiano. *Invemar*
- Posada, B. O., Henao, W. & Guzmán G. (2009). Diagnóstico de la erosión y sedimentación en la zona costera del Pacífico colombiano. *Invemar*
- Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala interdecadal hasta la escala diaria. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 28(107), 201-222.
- Prakash, T. N. (2003). Land suitability analysis for agricultural crops: A fuzzy Multicriteria Decision Making Approach. (MS Thesis). University of Twente.
- Prat, N., Ríos, B., Acosta, R. & Rieradevall, M. (2009). Los macroinvertebrados como indicadores de la calidad del agua. En E. Domínguez, & H. Fernández, (Eds.). *Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos* (1.a ed.) (pp. 631-654). Fundación Miguel Lillo.
- Prat, N., & Munné, A. (2014). Biomonitorio de la calidad del agua en los ríos ibéricos: lecciones aprendidas. *Limnetica*, 33(1), 47-64.
- Pringle, C. M. (2001). Hydrologic connectivity and the management of biological reserves: A global perspective. *Ecological Applications* 11, 981-998.
- Purves, W. K., Sadava, D., Orians, G. H. & Heller, H. C. (2003). *Life, the science of biology* (6.a ed.). Freeman and company.
- Putman, R. J. (1994). *Community Ecology*. Chapman & Hall.
- Quijas, S., B. Schmid & P. Balvanera. (2010). Plant diversity enhances provision of ecosystem services: a new synthesis. *Basic and Applied Ecology* 11, 582-593.
- Quiroga Martínez, R. (2007). Indicadores ambientales y de desarrollo sostenible: avances y perspectivas para América Latina y el Caribe (Serie Manuales N° 55). Naciones Unidas / CEPAL. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/5498>
- Quiroga Martínez, R. (2009). Guía metodológica para desarrollar indicadores ambientales y de desarrollo sostenible en países de América Latina y el Caribe. ONU.
- Ramírez, A., Restrepo, R., & Viña, G. (1997). Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales: Formulación y aplicación. *C. T. F. Ciencia, Tecnología y Futuro*, 1(3), 29–41.
- Reichwaldt, E. S., & Ghadouani, A. (2012). Effects of rainfall patterns on toxic cyanobacterial blooms in a changing climate: between simplistic scenarios and complex dynamics. *Water research*, 46(5), 1372-1393. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.11.052>
- Ríos-Mendoza, L., Ontiveros-Cuadras, J., León Vargas, D., Ruíz-Fernández, A. C., Rangel-García, M., Pérez-Bernal, L., & Sánchez-Cabeza, J. A. (2021). Microplastic contamination and fluxes in a touristic area at the SE Gulf of California. *Marine Pollution Bulletin*, 170, 112627. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112638>
- Rodríguez-Becerra, M. & Espinoza, G. (2002). D. Wilk (Ed.). *Gestión ambiental en América Latina y el Caribe*. Banco Interamericano de Desarrollo.

- Rodríguez-Rincón, A. M., Navarrete-Ramírez, S. M., Gómez-López, D. I. & Navas-Camacho, R. (2014). Protocolo Indicador Condición Tendencia Áreas Coralinas (ICTAC). Indicadores de monitoreo biológico del Subsistema de Áreas Marinas Protegidas (SAMP). Invemar, GEF y PNUD <https://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2018/12/0066-ProtocoloIndicadorCondicionTendenciaAreasCoralinasICTAC.pdf>
- Rojo, C. & Álvarez-Cobelas, M. (2003). Are there steady-state phytoplankton assemblages in the fields? *Hydrobiologia*, 502, 3-12.
- Roldán, G. & Ramírez, J. (2008). *Fundamentos de Limnología Tropical* (2.a ed.). Universidad de Antioquia.
- Rondeaux, G., Steven, M., & Baret, F. (1996). Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55(2), 95-107. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00186-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00186-7).
- Rosas, R. H. (2001). Estudio de la contaminación por metales pesados en la cuenca del río Llobregat (Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña). <https://www.tesisenred.net/handle/10803/6978#page-1>
- Rosell, C., Álvarez, G., Cahill, S., Campeny, R., Rodríguez, A. & Séiler, A. (2003). COST 341. La fragmentación del hábitat en relación con las infraestructuras de transporte en España. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
- Rosenberg, D., Noon, B. & Meslow, E. (1997). Biological corridors: Form, Function and Efficacy. *BioScience* 47, 677-687.
- Rosentreter, J. A., Borges, A. V., Deemer, B. R., Holgerson, M. A., Liu, S., Song, C., ... & Eyre, B. D. (2021). Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources. *Nature Geoscience*, 14(4), 225-230.
- Rozo G. J. (2016). Ejes estratégicos para la gestión ambiental de los humedales interiores de Bogotá D.C. con enfoque del buen vivir. Estudio de caso humedales: La Conejera, Santa María del Lago y El Burro. (Tesis de Magister). Universidad Francisco José de Caldas.
- Ruaro R. & Gubiani É. A. (2013). A scientometric assessment of 30 years of the Index of Biotic Integrity in aquatic ecosystems: applications and main flaws. *Ecological Indicators*, 29, 105-110.
- Ruaro, R., Gubiani, É. A., Hughes, R. M. & Mormul, R. P. (2020). Global trends and challenges in multimetric indices of biological condition. *Ecological Indicators*, 110, 105-862.
- Rueda, M., Bustos-Montes, D., Viloria, E. & Navarrete-Ramírez, S. M. (2014). Protocolo Indicador Uso de recursos hidrobiológicos. Indicadores de monitoreo biológico del SAMP. Invemar, GEF y PNUD. Serie de Publicaciones Generales del Invemar No. 72, Santa Marta. 40 p <https://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/08/protocolo-indicador-uso-de-recursos-hidrobiol%C3%B3gicos-indicadores-de-monitoreo-biol%C3%B3gico-del-subsistema-de-%C3%A1reas-marinas-protegidas.pdf>
- Ruibal A. L., Ruiz M. & Otaño S. (2009). Enfoques para la Evaluación y Manejo del Riesgo de cianobacterias. Niveles de alerta. En L. Giannuzzi (Ed.). *Cianobacterias y Cianotoxinas. Identificación, Toxicología, Monitoreo y Evaluación del Riesgo* (pp. 159-191).
- Rügnitz, M. T., Chacón, M. L. & Porro, R. (2009). Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales (1.a ed.). Consorcio Iniciativa Amazónica (IA) y Centro Mundial Agroforestal (Icraf).
- Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw Hill.
- San Vicente, M. G. (2003). Índices de fragmentación y conectividad para el indicador de biodiversidad y paisaje de la Comunidad Autónoma del País Vasco. Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio.
- Sanders, C. J., Maher, D. T., Tait, D. R., Williams, D., Holloway, C., Sippo, J. Z. & Santos, I. R. (2016). Are global mangrove carbon stocks driven by rainfall? *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 121(10), 2600-2609. <https://doi.org/10.1002/2016JG003510>
- Sandoval, J. A., Morales-Granados, M., & Rubio, D. (2020). Breve revisión del uso de microalgas para la remoción de contaminantes emergentes en aguas residuales. *Gestión y Ambiente*, 23(1), 127-137. <https://doi.org/10.15446/ga.v23n1.84034>
- Sastre, P., de Lucio, J. V., & Martínez, C. (2002). Modelos de conectividad del paisaje a distintas escalas. Ejemplos de aplicación en la Comunidad de Madrid. *Ecosistemas*, 11(2). <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/288/283>
- Schalles, J. F. (2006). Optical Remote Sensing Techniques to Estimate Phytoplankton Chlorophyll-a Concentrations in Coastal Waters with Varying Suspended Matter and CDOM Concentrations. En L. L. Richardson & E. F. LeDrew (eds.), *Remote Sensing of Aquatic Coastal Ecosystem Processes: Science and Management Applications* (pp. 27-79). Springer. https://doi.org/10.1007/1-4020-3968-9_3

- Secretaría de la Convención de Ramsar. (2010). Inventario, evaluación y monitoreo: Marco Integrado para el inventario, la evaluación y el monitoreo de humedales. Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales (4.a ed.), vol. 13.
- Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (2012). Documento metodológico para la elaboración del mapa geomorfológico, para la generación el mapa nacional de amenaza por movimientos en masa escala 1 : 100.000.
- Serrano, O., Gómez-López, D. I., Sánchez-Valencia, L., Acosta-Chaparro, A., Navas-Camacho, R., González-Corredor, J., Salinas, C., Masqué, P., Bernal, C. A., & Marbà, N. (2021). Seagrass blue carbon stocks and sequestration rates in the Colombian Caribbean. *Scientific Reports*, 11, 11067. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90544-5>
- Song, C., Dannenberg, M. P. & Hwang, T. (2013). Optical remote sensing of terrestrial ecosystem primary productivity. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 37(6), 834-854. <https://doi.org/10.1177/0309133313507944>
- Stein, W. & Mizzi, P. (2007). The harmonic consistency index for the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 177(1), 488-497.
- Stewart, R. H. (2008). Introduction to Physical Oceanography. Department of Oceanography, Texas A&M University. <https://oaktrust.library.tamu.edu/items/254c2944-dc14-445e-adde-663c63b4cc2e>
- Stoddard, J.L., Herlihy, A.T., Peck, D.V., Hughes, R.M., Whittier, T.R., Tarquinio, E. (2008). A process for creating multimetric indices for large-scale aquatic surveys. *Journal of the North American Benthological Society*, 27(4), 878-891.
- Strub, P. T., Mesías, J. M., Montecino, V., Rutllant, J. & Salinas, S. (1998). Coastal Ocean Circulation off Western South America. In A. R. Robinson & K. H. Brink (Ed.), *The Sea*, 11 (pp. 273-313). John Wiley and Sons.
- Sukachev, V. & Dylis, N. (1964). Fundamentals of forest biogeocoenology. (Trad. J. M. Maclennan). Oliver and Boyd.
- Sweeney, B. W., Bott, T. L., Jackson, J. K., Kaplan, L. A., Newbold, J. D., Standley, L. J., Hession, W. C., & Horwitz, R. J. (2004). Riparian deforestation, stream narrowing, and loss of stream ecosystem services. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(39), 14132-14137. <https://doi.org/10.1073/pnas.0405895101>
- Tauchnitz, N., Brumme, R., Bernsdorf, S. & Meissner, R. (2008). Nitrous oxide and methane fluxes of a pristine slope mire in the German National Park Harz Mountains. *Plant and Soil*, 303, 131-138. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9493-0>
- Tejada, C., Quiñonez, E., & Peña, M. (2014). Contaminantes Emergentes en Aguas: Metabolitos de Fármacos. Una Revisión. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 10(1), 80-101. <https://doi.org/10.18359/rfcb.341>
- The R Core Team. (2023). R: A language and environment for statistical computing (Versión 4.x). The R Foundation for Statistical Computing. <https://cran.r-project.org/doc/manuals/r-release/fullrefman.pdf>
- Torregroza, E., Hernández, M., Barraza, D., Gómez, A. & Borja, F. (2014). Unidades ecológicas para una gestión ecosistémica en el Distrito Cartagena de Indias (Colombia). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 17(1), 205-215.
- Torres, E., Alonso, J. C., Agudelo, E., Cárdenas, D., Cardona, G., López, R., Murcia-G, U. G., Marín, C., Núñez-Avellaneda, M., Peña-Venegas, C. P., Pérez, H., Puyana, A. M., Rendón, M. del M, Ricaurte, L. F., Sánchez, C. & Salazar, C. A. (2004). Ecosistemas: Amazonia colombiana, en Informe anual sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales renovables en Colombia. Ideam, Sinchi, IAVH, Invermar, Ministerio del Medio Ambiente, Imprenta Nacional de Colombia.
- Torres, J. F. & Pinilla, G. (2011). Estudio de la construcción de un canal paralelo a la vía existente entre San Marcos - Majagual - Achí. DPN, Universidad Nacional de Colombia.
- Torres-Sánchez, J., Peña, J.M., De Castro-Megías, A. I. & López-Granados, F. (2013). Configuration and Specifications of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Early Site-Specific Weed Management. *PLoS ONE*, 8(3), e58210.
- Townsend, P. A., Lookingbill, T. R., Kingdon, C. C., & Gardner, R. H. (2009). Spatial pattern analysis for monitoring protected areas. *Remote Sensing of Environment*, 113 (Special Issue), 1410-1420.
- Tucker, C. J. & Sellers, P. J. (1986). Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11), 1395-1416. <https://doi.org/10.1080/01431168608948944>
- Tucker, C. J., Sharman, M. J. & Ittersum, G. V. (1985). Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel: 1980-1984. *Remote Sensing Environmental*, 17, 233-249.
- Turnhout, E., Hisschemöller, M. & Eijsackers, H. (2007). Ecological indicators: Between the two fires of science and policy. *Ecological Indicators*, 7(2), 215-228. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2005.12.003>

- Unidad de Planeación Minero Energético [UPME]. (2014). Plan de infraestructura de transporte y portuaria para el desarrollo minero en Colombia. Caracterización distritos mineros. Manejo Ambiental Fase de Operación. <https://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1276>
- Unidad de Planificación Rural Agropecuaria [UPRA]. (2021). Evaluaciones Agropecuarias Municipales EVA. <https://upra.gov.co/es-co/eva-2021>
- Unidad de Planificación Rural Agropecuaria [UPRA]. (2019). Evaluaciones Agropecuarias Municipales EVA. <https://upra.gov.co/es-co/eva-2019>
- United States Department of Agriculture [USDA]. (2017). Keys to soil taxonomy by soil survey staff (14.a ed.). Natural Resources Conservation Service.
- United States Environmental Protection Agency [EPA]. (1996). Method 8141B: Organophosphorus compounds by gas chromatography with a nitrogen-phosphorus detector. Washington, D.C.: EPA.
- United States Environmental Protection Agency [EPA]. (2007). Method 8061A: Phthalate esters by gas chromatography with flame ionization detection (GC/FID). Washington, D.C.: EPA.
- Universidad Nacional de Colombia [UNC], & Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [MAVDT]. (2008). Metodología para la estimación del caudal ambiental en proyectos licenciados: Informe final.
- Vann, C. D. & Megonigal, J. P. (2003). Elevated CO₂ and water depth regulation of methane emissions: Comparison of woody and non-woody wetland plant species. *Biogeochemistry*, 63(2), 117-134. <https://doi.org/10.1023/A:1023397032331>
- Vannote, R. L., Minshall, G. W., Cummins, K. W., Sedell, J. R. & Cushing, C. E. (1980). The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37(1), 130-137.
- Verstappen, H. T., & Van Zuidam, R. A. (1992). El sistema ITC para levantamientos geomorfológicos, una base para la evaluación de recursos y riesgos naturales (Revised ed.). Enschede: ITC. 89 p.
- Villéger, S., Miranda, J. R., Hernández, D. F. & Moullot, D. (2010). Contrasting changes in taxonomic vs. functional diversity of tropical fish communities after habitat degradation. *Ecological Applications*, 20, 1512-1522.
- Viloria de la Hoz, J. (2003). Ganadería bovina en las llanuras del Caribe. Documentos de Trabajo sobre Economía Regional, 40. <https://d1b4gd4m8561gs.cloudfront.net/sites/default/files/publicaciones/archivos/DTSER-40.pdf>
- Villota, H. (1997). Sistema de Clasificación Fisiográfica. Unidad de Suelos – CIAF, Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá, D.C..
- Villota, H. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2005). Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de tierras. Bogotá, D.C.
- Vivas-Aguas, L. J. & Navarrete-Ramírez S. M. (2014). Protocolo Indicador Calidad de Agua (ICAMPFF). Indicadores de monitoreo biológico del Subsistema de Áreas Marinas Protegidas (SAMP). Invemar, GEF y PNUD. http://www.invemar.org.co/documents/10182/14479/04*ProtocoloIndicadorCalidaddeAguadigital.pdf/c16bd915-ob24-446b-gfe0-dbbc23911dd
- Vogelman, J. E. (1995). Assessment of forest fragmentation in southern New England using remote sensing and geographic information systems technology. *Conservation Biology*, 9(2), 439-449.
- Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S. E., Sullivan, C. A., Reidy Liermann, C., & Davies, P. M. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467(7315), 555-561. <https://doi.org/10.1038/nature09440>
- Wagener, T., Sivapalan, M. & McGlynn, B. (2008). Catchment Classification and Services-Toward a New Paradigm for Catchment Hydrology Driven by Societal Needs. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, (pp. 1-12). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa320>
- Walsh, J. E. (1995). Long-term observations for monitoring of the cryosphere. *Climatic Change*, 31(2-4), 369-394. <https://doi.org/10.1007/BF01095153>
- Wardrop, D. H., Kentula, M. E., Jensen, S. F., Stevens, D. L., Hychka, K. C. & Brooks, R. P. (2007). Assessment of wetlands in the upper Juniata watershed in Pennsylvania, USA using the hydrogeomorphic approach. *Wetlands*, 27, 432-445. [https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2007\)27\[432:AOWITU\]2.o.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2007)27[432:AOWITU]2.o.CO;2)
- Welch, P. S. (1952). *Limnology*. (2.a ed.). McGraw-Hill.
- Welcomme, R. L. (1979). *The Fisheries Ecology of Floodplain Fisheries*. Longman.
- Wetzel, R. (2001). *Limnology. Lake and river ecosystems*. (3.a ed). Academic Press.
- Whitaker, K. (2014). Testing methods for the estimation of carbon sequestration in wetlands. (Tesis de pregrado). University of Wollongong. <https://hdl.handle.net/10779/uow.27670209.v1>

- World Meteorological Organization [WMO] & United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization [Unesco]. (2012). Glosario Hidrológico Internacional. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000221862>
- World Wildlife Fund [WWF]. (2017). Colombia viva: Un país megadiverso de cara al futuro. Informe 2017. WWF-Colombia http://dzouvy59podg6k.cloudfront.net/downloads/colombia_viva_informe_2017_1.pdf
- Xie, M., Nghiem, L., Price, W., Elimelech, M., (2012). Comparison of the removal of hydrophobic trace organic contaminants by forward osmosis and reverse osmosis. *Water Research*, 46(8), 2683-2692. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.02.023>
- Xu. (2006). Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14) 3025-3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Yoo, J. C. & D'Odorico, P. (2002). Trends and fluctuations in the dates of ice break-up of lakes and rivers in Northern Europe: The effect of the North Atlantic Oscillation. *Journal of Hydrology*, 268(1-4), 100-112. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00161-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00161-0)
- Yvon-Durocher, G., Caffrey, J. M., Cescatti, A., Dossena, M., del Giorgio, P., Gasol, J. M., Montoya, J. M., Pumpanen, J., Staehr, P. A., Trimmer, M., Woodward, G., & Allen, A. P. (2012). Reconciling the temperature dependence of respiration across timescales and ecosystem types. *Nature*, 487(7408), 472-476. <https://doi.org/10.1038/nature11205>
- Zhang, S. (2012). Nearest neighbor selection for iteratively kNN imputation. *Journal of Systems and Software*, 85(11), 2541-2552. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2012.05.073>
- Zhao, C., Shao, N., Yang, S., Ren, H., Ge, Y., Zhang, Z. & Yin, X. (2019). Integrated assessment of ecosystem health using multiple indicator species. *Ecological Engineering*, 130, 157-168.
- Zhong, Y., Jiang, M., & Middleton, B. A. (2020). Effects of water level alteration on carbon cycling in peatlands. *Ecosystem Health and Sustainability*, 6(1): 1806113. <https://doi.org/10.1080/20964129.2020.1806113>
- Zhu, N., An, P., Krishnakumar, B., Zhao, L., Sun, L., Mizuochi, M. & Inamori, Y. (2007). Effect of plant harvest on methane emission from two constructed wetlands designed for the treatment of wastewater. *Journal of Environmental Management*, 85(4). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.11.004>
- Zimba, P. & Gitelson, A. (2006). Remote estimation of chlorophyll concentration in hypereutrophic aquatic systems: Model tuning and accuracy optimization. *Aquaculture*, 256, 272-286.
- Zinck, J. (2012). Geoedafología: Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales. ITC, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation..
- Zuo, Q., Liang, J. & Dou, M. (2010). Regionalization methodology systems of aquatic ecosystems in China and the case study of Huaihe River basin. *Journal of Resources and Ecology*, 1(4), 375-382.



Gambote Bolivar

