



Lineamientos conceptuales y metodológicos para la Evaluación Regional del Agua - ERA

Coordinación técnica:

Ómar Vargas Martínez

Martha García Herrán



MinAmbiente
Ministerio de Ambiente
y Desarrollo Sostenible

**PROSPERIDAD
PARA TODOS**

JUAN MANUEL SANTOS CALDERÓN
Presidente de la República de Colombia

LUZ HELENA SARMIENTO VILLAMIZAR
Ministra de Ambiente y Desarrollo Sostenible

PABLO ABBA VIEIRA SAMPER
Viceministro de Ambiente

ÓMAR FRANCO TORRES
Director General
Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)

NELSON ÓMAR VARGAS MARTÍNEZ
Subdirector de Hidrología – IDEAM

EDITORES
Ómar Vargas Martínez
Martha García Herrán
Subdirección de Hidrología – IDEAM

COMITÉ EDITORIAL
Ómar Vargas Martínez
Martha García Herrán

CORRECCIÓN DE ESTILO
Imprenta Nacional de Colombia

DISEÑO DE LA CARÁTULA
Bibiana Lissette Sandoval Báez
Grupo de Comunicaciones – IDEAM

DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN
Imprenta Nacional de Colombia

FOTOGRAFÍA DE LA CARÁTULA
Martha García Herrán

REPRODUCCIÓN, IMPRESIÓN Y EMPAQUE
Imprenta Nacional de Colombia

CÍTESE COMO

IDEAM, Lineamientos conceptuales y metodológicos
para la evaluación regional del agua. 2013. Bogotá, D. C. 276 págs.

Publicación aprobada por el Comité de Comunicaciones
y Publicaciones del IDEAM, julio de 2013, Bogotá D.C., Colombia.

ISBN: 978-958-8067-62-9 Distribución Gratuita

2013, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Todos los
derechos son reservados. Los textos pueden ser usados parcial o totalmente citando la
fuente. Su reproducción total o parcial debe ser autorizada por el IDEAM.

Impreso en Colombia – Printed in Colombia

**Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
Instituto de Hidrología, Meteorología
y Estudios Ambientales - IDEAM**

ÓMAR FRANCO TORRES
Director General - IDEAM

CLEMENTINA DEL PILAR GONZÁLEZ PULIDO
Secretaria General – IDEAM

CONSEJO DIRECTIVO

LUZ HELENA SARMIENTO VILLAMIZAR
Ministra de Ambiente y Desarrollo Sostenible

CECILIA ÁLVAREZ CORREA-GLEN
Ministra de Transporte

TATIANA OROZCO DE LA CRUZ
Directora General
Departamento Nacional de Planeación- DNP

JORGE RAÚL BUSTAMANTE ROLDÁN
Director General
Departamento Nacional de Estadísticas-DANE

JUAN PABLO RUIZ SOTO
Delegado
Presidencia de la República

RAMÓN LEAL LEAL
Director Ejecutivo.
Asociación de Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible – ASOCARS

PAULA MARCELA ARIAS PULGARÍN
Directora General
Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación -Colciencias

CLEMENTINA DEL PILAR GONZÁLEZ PULIDO
Secretaria Técnica del Consejo

DIRECTIVAS

NELSON ÓMAR VARGAS MARTÍNEZ
Subdirector de Hidrología

JOSÉ ALAIN HOYOS HERNÁNDEZ
Subdirector de Estudios Ambientales

MARÍA SARALUX VALBUENA LÓPEZ
Subdirectora de Ecosistemas e Información Ambiental

MARÍA TERESA MARTÍNEZ GÓMEZ
Subdirectora de Meteorología

CHRISTIAN FELIPE EUSCATEGUI COLLAZOS
Jefe Oficina Pronósticos y Alertas

FAVIANA ESTHER FAJARDO FERREIRA
Jefe (E) Oficina Asesora de Planeación

JUAN JOSÉ POSADA URIBE
Coordinador Grupo de Comunicaciones

LEONARDO CÁRDENAS CHITIVA
Jefe Oficina de Informática

ADRIANA PORTILLO TRUJILLO
Jefe Oficina Asesora Jurídica

[4] MARÍA EUGENIA PATIÑO JURADO
Jefe Oficina Control Interno

AUTORES

**Instituto de Hidrología, Meteorología
y Estudios Ambientales - IDEAM.
Subdirección de Hidrología**

Martha García Herrán
Nelson Ómar Vargas Martínez
Félix Darío Sánchez Lancheros
Ana Karina Campillo Pérez
Consuelo Onofre Encinales
Adriana González Vásquez
Nancy Alfonso Bernal
Silvia Aguirre Giraldo
Pilar Galindo Garzón

Editor de figuras y tablas

Silvia Aguirre Giraldo

COLABORADORES

**Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM
Subdirección de Hidrología**

Gabriel Saldarriaga
Claudia Contreras
Luz Consuelo Orjuela
Claudia Garzón

Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible

Dirección de Recurso Hídrico
Oficina de Negocios Verdes y Sostenibles

Autoridades ambientales y entidades regionales

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca
Corporación Autónoma Regional de Caldas
Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare
Secretaría Distrital de Ambiente
Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá
Fondo de Prevención y Atención de Emergencias
Funcionarios de Corporaciones Autónomas Regionales, Corporaciones de Desarrollo Sostenible,
Autoridades Ambientales Urbanas, Parques Nacionales Naturales y sus Territoriales

Consultores independientes

José Agustín Herrera
Rafael Colmenares

Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible (PNUD) Proyecto PRICC

Francisco Canal
Diana Rojas

Universidad Central

Facultad de Ingeniería Ambiental: Rodrigo Marín.

Fotografías

Archivo IDEAM: Martha García Herrán, Andrés Herreño, Germán Sopo.

Contenido

INTRODUCCIÓN	17
---------------------	----

PARTE I. MARCO GENERAL DE LAS EVALUACIONES REGIONALES DEL AGUA (ERA)	21
---	----



CAPÍTULO 1. CONTEXTO GENERAL	23
-------------------------------------	----

1.1.	Propósito de las Evaluaciones Regionales del Agua	23
1.2.	Justificación de las Evaluaciones Regionales del Agua	24
1.3.	Marco contextual	25
1.3.1.	Estudio Nacional del Agua 2010 como referente de evaluación del agua en Colombia	26
1.3.2.	Política Nacional para la Gestión Integral Recurso Hídrico en Colombia y Plan Hídrico Nacional	27
1.3.3.	Proceso de planificación, ordenamiento ambiental y del territorio	27
1.3.4.	Sistema de información Ambiental - Componente SIRH	29
1.3.5.	Las ERA en el marco normativo e institucional	30
1.4.	Alcance y naturaleza de las Evaluaciones Regionales del Agua	30



CAPÍTULO 2. MARCO CONCEPTUAL	33
-------------------------------------	----

2.1.	Premisas conceptuales básicas	33
2.1.1.	Marco teórico de respaldo	33
2.1.2.	Enfoque conceptual temático	38
2.2.	Sistema de indicadores hídricos regionales	38



CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO DE LAS ERA	43
--	----

3.1.	Procedimiento general para la evaluación del agua en las regiones	43
3.2.	Instrumentos	44
3.2.1.	Instrumentos técnicos	45
3.2.2.	Instrumentos de planificación	48
3.2.3.	Instrumentos económicos	48
3.3.	Sistema de Información Ambiental – Componente SIRH	49
3.3.1.	Elementos conceptuales del SIRH	50
3.3.2.	Funcionamiento del SIRH	52
3.3.3.	Conjunto de datos del SIRH	55
3.3.4.	Modelo de datos y tareas de estandarización	56

3.3.5.	Calidad de la información	57
3.4.	Fuentes de información nacional y regional.	57
3.5.	Métodos y técnicas en las ERA	58
3.6.	Modelamiento espacial	58
3.6.1.	Información geográfica	59
3.6.2.	Gestión documental	63
3.6.3.	Marco metodológico	64

PARTE II. ELEMENTOS CONCEPTUALES Y METODOLÓGICOS TEMÁTICOS 69

CAPÍTULO 1. EVALUACIÓN DEL ESTADO Y DINÁMICA DEL AGUA SUPERFICIAL 71

1.1.	Marco conceptual	71
1.1.1.	Procesos del ciclo del agua	72
1.1.2.	Régimen hidrológico	72
1.1.3.	Dinámica de los sedimentos	73
1.1.4.	Balace hídrico en unidades hidrográficas de análisis regional	76
1.1.5.	Conceptos clave en la evaluación de la oferta hídrica superficial	79
1.2.	Marco metodológico	80
1.2.1.	Características morfológicas y fisiográficas de unidades hídricas superficiales de análisis	81
1.2.2.	Características del régimen hidrológico	83
1.2.3.	Elementos metodológicos para evaluación de sedimentos	90
1.2.4.	Procedimiento para la evaluación y la caracterización de la oferta hídrica superficial y su disponibilidad	91
1.2.5.	Métodos y técnicas para evaluar la oferta hídrica superficial	96
1.2.6.	Instrumentos	99
1.2.7.	Información	101
1.2.8.	Modelamiento espacial de la oferta hídrica superficial	102



CAPÍTULO 2. EVALUACIÓN DE DINÁMICA Y ESTADO DEL AGUA SUBTERRÁNEA 109

2.1.	Marco conceptual	109
2.1.1.	Reservas y recargas de aguas subterráneas	120
2.1.2.	Modelo Hidrogeológico Conceptual	123
2.2.	Marco metodológico para la evaluación de las aguas subterráneas	128
2.2.1.	Unidades de análisis	128
2.2.2.	Procedimientos	130
2.2.3.	Instrumentos	134



2.2.4.	Métodos y técnicas	134
2.2.5.	Fuentes de información	136
2.2.6.	Modelamiento espacial	136
2.2.7.	Recarga de acuíferos	139



CAPÍTULO 3. EVALUACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA

		143
3.1.	Marco conceptual	144
3.1.1.	Conceptos básicos	145
3.1.2.	Dinámica del uso y demanda de agua	147
3.1.3.	Los sectores usuarios objeto de análisis	147
3.2.	Marco metodológico para la evaluación de demanda de agua	148
3.2.1.	Procedimiento para la evaluación de la demanda de agua en las regiones	148
3.2.2.	Consideraciones para el cálculo de la demanda de agua	149
3.2.3.	Unidad de análisis para la demanda, resolución espacial y temporal	163
3.2.4.	Requisitos de información	163
3.2.5.	Modelamiento espacial para la demanda	165
3.2.6.	Propuesta técnica para mejorar la información del consumo de agua	168
3.2.7.	Demanda proyectada de agua por sector	170



CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA

		173
4.1.	Marco conceptual	173
4.1.1.	Conceptos sobre calidad de las aguas	173
4.1.2.	Modelo conceptual para la evaluación regional de calidad del agua	175
4.1.3.	Los sectores usuarios objeto de análisis para la evaluación regional de calidad del agua	185
4.1.4.	Particularidades de la evaluación hidrogeoquímica y la calidad de las aguas subterráneas	185
4.2.	Marco metodológico para la evaluación de calidad del agua	194
4.2.1.	Procedimiento para la evaluación de la calidad de agua superficial en la región	194
4.2.2.	Procedimiento para evaluación hidrogeoquímica y de calidad del agua subterránea	196
4.2.3.	Métodos y técnicas	201
4.2.4.	Información y unidades de análisis	207
4.2.5.	Modelamiento espacial para la calidad de agua	209

CAPÍTULO 5. COMPONENTE DE RIESGO EN LA EVALUACIÓN REGIONAL DEL AGUA

	211
5.1. Marco conceptual	211
5.1.1. Conceptos básicos	212
5.1.2. Modelo conceptual de amenazas y vulnerabilidades del sistema hídrico natural	213
5.1.3. Modelo conceptual para evaluar la vulnerabilidad del recurso hídrico	214
5.1.4. Modelo conceptual para amenazas al territorio.	215
5.2. Procedimiento metodológico	217
5.2.1. Amenazas al sistema hídrico natural por variabilidad y cambio climático	217
5.2.2. Amenazas al sistema hídrico natural por pérdidas de ecosistemas reguladores	217
5.2.3. Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de acuíferos	218
5.2.4. Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de aguas superficiales	218
5.2.5. Vulnerabilidad al desabastecimiento del agua	219
5.2.6. Vulnerabilidad a la disponibilidad del agua por calidad	219
5.2.7. Inundaciones	220
5.2.8. Avenidas torrenciales	220
5.3. Marco normativo del riesgo	221



PARTE III. SISTEMA DE INDICADORES HÍDRICOS REGIONALES

223

CAPÍTULO 1. CONCEPTOS Y METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE INDICADORES DE SISTEMA HÍDRICO NATURAL

	225
1.1. Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH)	225
1.2. Índice de Aridez (IA)	227
1.3. Índice de Vulnerabilidad Intrínseca a la Contaminación de Agua Subterránea (IVICAS)	230



CAPÍTULO 2. CONCEPTOS Y METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE INDICADORES DE INTERVENCIÓN ANTRÓPICA

	233
2.1. Indicadores de presión por uso del agua	233
2.1.1. Índice de Uso del Agua superficial (IUA)	233



2.1.2.	Índice de Extracción de Agua Subterránea (IEAS)	235
2.1.3.	Índice de agua Subterránea para Abastecimiento Público con respecto al número de habitantes (IASAP)	236
2.1.4.	Índice Integral de Uso de Agua (IIUA)	237
2.2.	Indicadores de estado de la calidad de agua y presión por contaminación	238
2.2.1.	Índice de Calidad del Agua (ICA)	238
2.2.2.	Índice de Calidad Biológica del Agua. Macroinvertebrados Acuáticos (IMA)	240
2.2.3.	Índice de Alteración potencial de la Calidad de Agua (IACAL)	243
2.3.	Indicadores de riesgo en la evaluación regional del agua	247
2.3.1.	Índice de Vulnerabilidad por desabastecimiento Hídrico (IVH)	247
2.3.2.	Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET)	248
2.3.3.	Índice de Agua Subterránea para Abastecimiento Público con respecto al número de habitantes (IASAP)	252

PARTE IV. ESTRATEGIA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA ERA EN LAS AUTORIDADES AMBIENTALES	255
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	263
ANEXO 1	273

Listado de tablas

Tabla 1.	Componentes y parámetros para la caracterización del régimen de caudales	83
Tabla 2.	Densidad mínima de estaciones recomendadas (área en km ² por estación)	99
Tabla 3.	Área de influencia y número de estaciones	100
Tabla 4.	Leyenda mapas oferta hídrica superficial	106
Tabla 5.	Valores de permeabilidad	115
Tabla 6.	Valores de porosidad efectiva para diferentes materiales de la corteza terrestre	116
Tabla 7.	Valores de transmisividad para diferentes tipos de materiales	117
Tabla 8.	Valores de coeficiente de almacenamiento	118
Tabla 9.	Leyenda mapas demanda hídrica	168
Tabla 10.	Mayores problemas de calidad del agua superficial a escala global	183
Tabla 11.	Implicaciones de la litología en la composición del agua subterránea	189
Tabla 12.	Error admisible del balance iónico en relación con la conductividad	190
Tabla 13.	Contaminantes y fuentes de contaminación	193
Tabla 14.	Definición de términos comunes relacionados con la contaminación del agua subterránea	199
Tabla 15.	Categorías del Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH)	226
Tabla 16.	Categorías para el Índice de Aridez (IA)	228
Tabla 17.	Rangos y categorías del Índice de Uso del Agua (IUA)	235
Tabla 18.	Variables involucradas en el cálculo del ICA (6)	239
Tabla 19.	Variables involucradas en el cálculo del ICA (7)	239
Tabla 20.	Descriptor de calidad del ICA	239
Tabla 21.	Valoración de la calidad biológica del agua por el IMA	242
Tabla 22.	Categoría y descriptor del IACAL	246
Tabla 23.	Relaciones para categorizar el índice morfométrico	249
Tabla 24.	Relaciones entre variables para el índice morfométrico	249
Tabla 25.	Clasificación del índice de variabilidad	250
Tabla 26.	Clasificación del Índice de Vulnerabilidad frente a Eventos Torrenciales (IVET)	251
Tabla 27.	Pasos para la implementación de las ERA en las autoridades ambientales	261

Listado de figuras

Figura 1.	Estructura de Planificación de la PNGIRH	28
Figura 2.	Esquema conceptual – metodológico de las ERA	31
Figura 3.	Ciclo hidrológico	34
Figura 4.	Procesos del ciclo hidrológico en páramos	35
Figura 5.	Estructura de las Evaluaciones Regionales del Agua (ERA)	36
Figura 6.	Modelo del Sistema de Indicadores Hídricos	40
Figura 7.	Sistema de Indicadores Hídricos Regionales	41
Figura 8.	Esquema metodológico para la Evaluación Regional del Agua	44
Figura 9.	Síntesis Elementos conceptuales del Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH)	50
Figura 10.	Componentes del Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH)	53
Figura 11.	Fases de documentación de información	54
Figura 12.	Pasos para mejorar la calidad de los datos	57
Figura 13.	Requerimientos información geográfica ERA	61
Figura 14.	Procedimiento Metodológico para el Modelamiento Espacial de las ERA	65
Figura 15.	Procesamiento de la información geográfica	67
Figura 16.	Clasificación del transporte de sedimentos	74
Figura 17.	Esquema fuentes puntuales de sedimentos suspendidos	76
Figura 18.	Procedimiento general para evaluar el componente de agua superficial en las ERA	81
Figura 19.	Flujograma regionalización de caudales máximos	87
Figura 20.	Relación Elevación (msnm) vs. Precipitación - Cuenca alta del río Magdalena	88
Figura 21.	Relación área vs. Caudal índice	89
Figura 22.	Procedimiento para la evaluación de la oferta hídrica superficial en las regiones	92
Figura 23.	Procedimiento para la determinación del caudal ambiental	95
Figura 24.	Relación elevación vs. Evapotranspiración Potencial	98
Figura 25.	Caudales estimados vs. Caudales observados	98
Figura 26.	Área de influencia y número de estaciones	100
Figura 27.	Procedimiento espacialización oferta hídrica superficial	104
Figura 28.	Códigos dirección del flujo	104
Figura 29.	Esquema de circulación permanente de aguas subterráneas	110
Figura 30.	Distribución de agua en el subsuelo	110
Figura 31.	Modificación del flujo de aguas subterráneas por efecto de captaciones	111
Figura 32.	Acuíferos libres, confinados y semiconfinados	112
Figura 33.	Tipos de manantiales	114
Figura 34.	Sección hipotética para ilustrar típicos regímenes de flujo de agua subterránea y tiempos de residencia subterránea bajo condiciones húmedas	120
Figura 35.	Relaciones posibles entre río-acuífero	123

Figura 36.	Modelo Hidrogeológico Conceptual	124
Figura 37.	Construcción de un modelo hidrogeológico conceptual de la Sabana de Bogotá a partir de información geográfica, geológica, hidrodinámica e hidrológica	125
Figura 38.	Divergencia de límites hidrográficos e hidrogeológicos	126
Figura 39.	Sistemas de flujo de aguas subterráneas	127
Figura 40.	Procedimiento para la evaluación de Sistemas Acuíferos en las ERA	130
Figura 41.	Esquema Lógico para la elaboración de mapas hidrogeológicos	139
Figura 42.	Alcance y finalidad del marco normativo y de política para la toma de decisiones con relación al uso del agua	143
Figura 43.	Conceptos básicos que definen la demanda hídrica a nivel regional	145
Figura 44.	Dinámica del uso de agua regional	147
Figura 45.	Procedimiento para la evaluación de demanda de agua en las regiones	149
Figura 46.	Procedimiento espacialización de la demanda hídrica	166
Figura 47.	Unidades espaciales de análisis (Cuenca río Las Ceibas)	167
Figura 48.	Mejoramiento de la información	170
Figura 49.	Modelo conceptual para la evaluación de la calidad de agua en las regiones	175
Figura 50.	Mapa conceptual de la contaminación	179
Figura 51.	Procesos que determinan la composición del agua subterránea	188
Figura 52.	Diagrama de Piper para la clasificación de facies hidrogeoquímicas	191
Figura 53.	Diagrama de Stiff	192
Figura 54.	Relaciones iónicas entre cationes y aniones	192
Figura 55.	Usos del suelo que generan contaminación de acuíferos	192
Figura 56.	Procedimiento general para evaluación de la calidad del agua	194
Figura 57.	Procedimiento metodológico para la evaluación hidrogeoquímica y calidad de las aguas subterráneas	196
Figura 58.	Generación de un mapa de vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero, utilizando la metodología GOD, con base en las características hidrogeológicas de la zona no saturada o de las capas confinantes suprayacentes	200
Figura 59.	Perímetros de protección de pozos	200
Figura 60.	Estructura general de los protocolos de monitoreo	202
Figura 61.	Pasos a seguir para seleccionar los sitios de muestreo	204
Figura 62.	Procedimiento espacialización de la calidad del agua	209
Figura 63.	Modelo conceptual de análisis de amenazas y vulnerabilidades del sistema hídrico natural	213
Figura 64.	Modelo conceptual para evaluar la vulnerabilidad del recurso hídrico	215
Figura 65.	Modelo conceptual para análisis de amenazas en el territorio	216
Figura 66.	Curva de Duración de Caudales	226
Figura 67.	Diagrama metodológico para procesamiento de información para el IACAL	244
Figura 68.	Espacialización de Indicadores Hídricos Regionales	253

Listado de siglas y acrónimos

SIGLA	DEFINICIÓN	SIGLA	DEFINICIÓN
ANH	Agencia Nacional de Hidrocarburos	ETC	Evapotranspiración del Cultivo
IPCC-AR4	Fourth assessment report (en español, Cuarto Informe de Evaluación).	ETP	Evapotranspiración Potencial
AUGURA	Asociación de Bananeros de Colombia	ETR	Evapotranspiración Real
CAN	Comunidad Andina de Naciones	FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
CAR	Corporación Autónoma Regional Pacto sobre Derechos Económicos, Sociales y Culturales (por su sigla en inglés)	Fedegán	Federación Colombiana de Ganaderos
CESCR	Centro de incubación y especies menores	Fenavi	Federación Nacional de Avicultores de Colombia
CIEM	Clasificación Industrial Internacional Uniforme	FUNIA	Formulario Único Nacional de Inventario de Aguas Subterráneas
CIU	Corporación Autónoma Regional de las cuencas de los ríos Negro y Nare	GIRH	Gestión Integrada de Recurso Hídrico
CORNARE	Corporación para el Desarrollo Sostenible del Sur de la Amazonía	GPPS	Mecanismo de Generación con Periodo de Planeación Superior
Corpoamazonía	Clasificación Central de Productos	HIMAT	Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras
CPC	café pergamino seco	IA	Índice de Aridez
cps	Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico	IACAL	Índice de Alteración potencial de la Calidad del Agua
CRA	Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca	IASAP	Índice de Agua Subterránea para Índice Abastecimiento Público con respecto al número de habitantes
CVC	Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente de Barranquilla	ICA	Índice de Calidad del Agua
DAMAB	Departamento Administrativo Nacional de Estadística	ICDE	Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales
DANE	Demanda Bioquímica de Oxígeno	IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
DBO	Modelos digitales de elevación de terreno	IEAS	Índice de Extracción de Agua Subterránea
DEM	Dirección de Metodología y Producción Estadística	IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
DIMPE	Dirección Nacional de la Policía Antinarcóticos	IMA	Índice de Calidad Biológica del Agua. Macroinvertebrados Acuáticos
DIRAN	Departamento Nacional de Planeación	INGEOMINAS	Instituto Colombiano de Geología y Minería.
DNP	Demanda de agua para uso doméstico	PMSV	Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos
DUD	Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá	PUEAA	Programa de Uso Eficiente y Ahorro del Agua
EAAB	Encuesta Ambiental Industrial	RAS	Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico
EAI	Encuesta Anual Manufacturera del 2007	SCMH	Servicio Colombiano de Hidrología y Meteorología
EAM	Estudio Nacional del Agua	SDA	Secretaría Distrital de Ambiente
EAM 2007	Evaluación Regional del Agua	SDAB	Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá
ENA		SIA	Sistema de Información Ambiental
ERA		SIAC	Sistema de Información Ambiental para Colombia

ESP	Empresas de Servicios Públicos
SIAT	Subsistemas de Información Territoriales
SIGME	Sistema de Información del Ministerio de Minas y Energía
SIMCI	Sistema Integrado de Monitoreo de Cultivos Ilícitos
SINA	Sistema Nacional Ambiental
SINVEU	Sistema de Información de Vivienda y Desarrollo Territorial
SIPGA	Sistema de Información para la Planeación y Gestión Ambiental
SIRH	Sistema de Información del Recurso Hídrico
SISBIM	Sistemas Básicos de Información Municipal
SSPD	Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios
SST	Sólidos Suspendidos Totales
STAR	Sistema de tratamiento de Aguas Residuales
SUI	Sistema Único de Información de Servicios Públicos
TUA	Tasa por Uso del Agua
UICN	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales
UMATA	Unidades Municipales de Asistencia Técnica Agropecuaria
Unesco	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
IHE Unesco	Institute for Water Education (Instituto Unesco-IHE para la Educación sobre el Agua)
UNODC	Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito
UPME	Unidad de Planeación Minero-Energética
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos (U.S. Geological Survey).
WMO	World Meteorological Organization (Organización Meteorológica Mundial-OMM)
WWAP	World Water Assessment Programme (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos)

Instituto de
Hidrología,
Meteorología
y Estudios
Ambientales -
IDEAM



Introducción

La Gestión Integral de Recurso Hídrico (GIRH) (MAVDT, 2010a) en las regiones requiere información y conocimiento adecuados sobre el comportamiento y estado del agua (en cantidad y calidad), expresados en la distribución espacial y variación temporal de variables relacionadas con la oferta y disponibilidad, calidad, uso y demanda, amenazas y vulnerabilidad de los sistemas hídricos y del recurso asociadas con variabilidad climática y posibles escenarios de cambio climático.

Lo anterior supone evaluaciones a partir de unidades hídricas de análisis espaciales y temporales de mayor resolución que las utilizadas en los estudios nacionales del agua que se elaboran en el marco de las funciones y competencias del IDEAM (IDEAM, 2010a). Implica igualmente abordar el tema conceptual y metodológico con un alcance apropiado para seguimiento del recurso y toma de decisiones en este nivel, que tengan coherencia con los procesos y desarrollos del nivel nacional y a la vez pertinencia con las especificidades que requiere la gestión del agua en las regiones.

En el Decreto 1277 de 1994, por el cual se organiza y establece el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM-, en el artículo 15, numeral 1 establece que el IDEAM es fuente oficial de información científica en las áreas de su competencia y autoridad máxima en las áreas de hidrología y meteorología así como en el Decreto 2241 de 1995 en el artículo 20, numerales 1 y 2. Así mismo en su numeral 3, el IDEAM debe proponer al Ministerio, protocolos, metodologías, normas y estándares para el acopio de datos, el procesamiento, transmisión, análisis y difusión de la información que sobre el medio ambiente y los recursos naturales realicen los institutos de investigación ambiental, las corporaciones y demás entidades que hacen parte del Sistema de Información Ambiental.

El IDEAM elaboró y publicó el Estudio Nacional del Agua 2010 (ENA 2010 en adelante) con el propósito de dar a conocer la situación actual y posibles escenarios futuros del agua en Colombia. Generó información y escenarios que se constituyeron en el insumo técnico para el diagnóstico de la Política Nacional para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (PNGIRH en adelante), expedida en 2010, en relación con los grandes temas de los objetivos específicos de oferta, demanda, calidad de agua y riesgo asociado con la disponibilidad del recurso (MAVDT, 2010a). Los niveles de la información y resultados del ENA 2010 son particularmente representativos para la toma de decisiones en el nivel nacional e importante referente para avanzar en el escalamiento en el orden regional. El estudio utiliza como unidades de análisis básicas la zonificación hidrográfica del país, publicada por el IDEAM conjuntamente con el IGAC en el 2010.

El IDEAM, a través de la Subdirección de Hidrología, en el marco de sus funciones y del Plan Estratégico de Investigación Ambiental (PENIA) en su línea de orientar y caracterizar la estructura y dinámica de la base natural del país en sus componentes abióticos, en este caso el agua y sus relaciones con la biota, consideró necesario avanzar en la construcción conceptual y metodológica para la realización de Evaluaciones Regionales del Agua (ERA) coherentes con los desarrollos y resultados del Estudio Nacional de Agua 2010 y sus actualizaciones y los objetivos de la PNGIRH.

El desarrollo conceptual y metodológico para las ERA y su aplicación regional permitirán a las autoridades ambientales avanzar en el conocimiento, la disponibilidad y eficiencia en generación de información sobre el comportamiento y estado del agua en Colombia, presiones y escenarios futuros para el mejoramiento de su gestión. La actualización de las ERA se realizará de manera periódica y sistemática y se plasmará en un documento que se denominará Estudio Regional del Agua, el cual a su vez permitirá retroalimentar la actualización periódica del Estudio Nacional del Agua. Los resultados e indicadores hídricos de las ERA y el ENA facilitan el seguimiento del estado del agua en las cuencas del país en sus diferentes niveles a partir del ingreso y disponibilidad de información en el Sistema de Información Ambiental y su correspondiente subsistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH).

Este documento conceptual y metodológico fue construido con aportes del grupo de trabajo de la Subdirección de Hidrología en el IDEAM, la participación de entidades del SINA y el concurso de expertos en el tema. En particular con diferentes dependencias del Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) y Autoridades Ambientales Regionales (Corporaciones Autónomas Regionales, Autoridades Ambientales Urbanas y Territoriales de la Unidad de Parques Naturales Nacionales). Se constituye en una guía conceptual y metodológica para desarrollar el proceso de evaluación permanente del agua en las regiones con cortes periódicos, documentados en Estudios Regionales del Agua, que dan cuenta del estado y dinámica del agua como insumo técnico para planificación ambiental, territorial y toma de decisiones en la región.

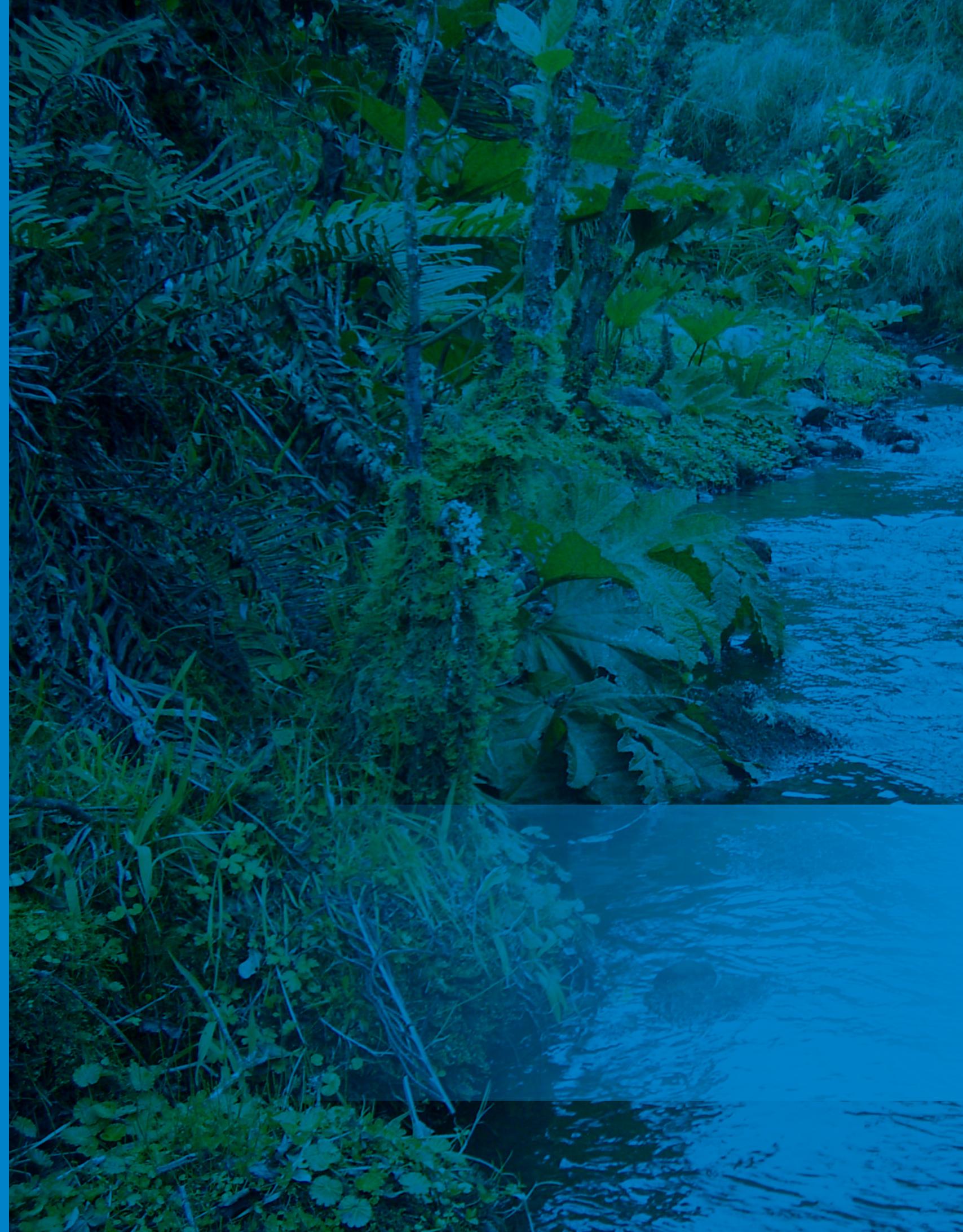
El documento se soporta en el marco jurídico institucional vigente, el análisis bibliográfico de estudios regionales de agua o similares desarrollados en otros países y metodologías disponibles para la evaluación de oferta hídrica, disponibilidad, demanda, calidad, riesgos e indicadores regionales asociados. La PNGIRH, los desarrollos conceptuales y metodológicos del Estudio Nacional del Agua 2010, la Guía de Ordenamiento de Cuencas, incluyendo avances en el proceso de ajuste de la misma, entre otros, son el marco de referencia básico de la propuesta.

El documento consta de cuatro partes correspondientes a i) Marco General de las ERA donde se ilustra el contexto general, el marco conceptual y marco

metodológico de las Evaluaciones regionales del Agua; ii) Elementos conceptuales y metodológicos de los componentes temáticos donde se precisa el referente conceptual de los diferentes componentes y se desarrolla la metodología para abordar los temas de oferta y disponibilidad de agua; usos y demanda hídrica; contaminación y condiciones de calidad de agua; la evaluación de amenaza y vulnerabilidad de las fuentes hídricas y el recurso en relación con la afectación al régimen hidrológico y disponibilidad hídrica; iii) Sistema de Indicadores Hídricos Regionales; y iv) Estrategia de implementación de las ERA.

En el primer capítulo se presentan el propósito, justificación, alcance y el contexto en el que se genera la propuesta. El segundo capítulo abarca el marco conceptual de soporte incluyendo el sistema de indicadores hídricos regionales. El tercer capítulo se ocupa del marco metodológico con el procedimiento general para la construcción de las ERA.

De esta manera se presenta un documento guía que deberá ser implementado por las autoridades ambientales regionales en el marco del Decreto 1640 de 2012.





PARTE I

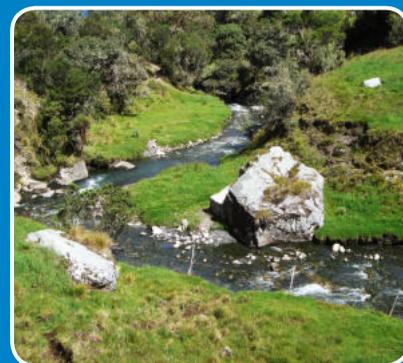
Marco general de las Evaluaciones
Regionales del **agua-era**



Capítulo 1.
Contexto general



Capítulo 2.
Marco conceptual



Capítulo 3.
Marco metodológico de las ERA





Capítulo 1

Contexto general

En este capítulo se presenta el propósito de las Evaluaciones Regionales del Agua (ERA), la justificación, el contexto en el cual se proponen y el alcance incluyendo el ámbito para su aplicación.

1.1. Propósito de las Evaluaciones Regionales del Agua

Objetivo general

Evaluar el estado, dinámica y tendencias de los sistemas hídricos como resultado de la interacción de procesos naturales y antrópicos para una adecuada administración, uso y manejo sostenible del agua en las regiones de Colombia.

Objetivos específicos

- a. Caracterizar y evaluar el estado, dinámica y tendencia de la oferta de agua superficial, subterránea y su disponibilidad, en unidades hídricas de análisis representativas en las regiones del país.
- b. Caracterizar y evaluar el estado actual y tendencias de las presiones sobre los sistemas hídricos por uso de agua y carga contaminante proveniente de sectores usuarios del recurso en unidades representativas para las regiones del país.
- c. Caracterizar y evaluar las condiciones de *calidad* de agua en las corrientes y cuerpos de agua de las regiones y afectación que ejercen los diferentes sectores usuarios del recurso tanto para condiciones actuales como tendenciales.
- d. Evaluar las amenazas y vulnerabilidades asociadas a la afectación del régimen hidrológico que afecten la oferta natural disponible y su calidad, la vulnerabilidad del recurso hídrico y las amenazas sobre el territorio relacionadas con la dinámica natural del agua.
- e. Realizar análisis integrados de las condiciones actuales y tendenciales del régimen hídrico referidas al estado y disponibilidad a partir de indicadores hídricos e hidrobiológicos.

1.2. Justificación de las Evaluaciones Regionales del Agua

Las evaluaciones regionales del agua fueron reglamentadas en el Decreto 1640, artículo 8. En este artículo se precisa que “Las autoridades ambientales competentes elaborarán las Evaluaciones Regionales del Agua que comprenden el análisis integrado de la oferta, demanda, calidad y análisis de los riesgos asociados al recurso hídrico en su jurisdicción para la zonificación hidrográfica de la autoridad ambiental, teniendo como base las subzonas hidrográficas”. En el párrafo 1 de este mismo artículo se le atribuye al IDEAM la definición de “los lineamientos técnicos para el desarrollo de las evaluaciones Regionales del Agua, en un término de un (1) año a partir de la publicación del presente decreto”. Así mismo, en el párrafo dos (2) le da un plazo a las autoridades ambientales de tres años, a partir de la elaboración de los lineamientos referidos, para su desarrollo. Finalmente, en el Parágrafo 3 se refiere a los Estudios Regionales del Agua que corresponden a cortes periódicos sobre el estado y dinámica del recurso hídrico, como insumo para la ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas.

La gestión integrada del agua en las regiones requiere información y conocimiento adecuados sobre las características, el comportamiento y el estado del agua (en cantidad y calidad), expresados en la distribución espacial y variación temporal de variables asociadas a la oferta y disponibilidad, calidad, uso y demanda, riesgos de los sistemas hídricos y su aprovechamiento asociados a la variabilidad climática e hidrológica, las actividades humanas actuales y proyectadas y posibles escenarios de cambio climático.

La información requerida para la gestión del agua debe ser pertinente, suficiente y confiable en unidades hídricas de análisis espaciales y temporales de mayor resolución que las utilizadas en el ámbito nacional como el Estudio Nacional del Agua 2010. El documento que se está presentando permite en este sentido, orientar los procesos de evaluación del agua en las regiones para alcanzar los objetivos de la PNGIRH fundamentada en la GIRH. Estas evaluaciones por supuesto requieren una base técnica de información y conocimiento generados con rigor conceptual, obtenidos de forma sistemática aplicando metodologías, protocolos y estándares que sean compartidos entre las autoridades ambientales. El valor agregado de esta información se consolidará en las ERA y debe permitir la comunicación, coordinación y eficiente interacción al interior de las autoridades ambientales, entre autoridades ambientales y con las entidades del SINA del orden nacional de manera eficiente y eficaz.

Las Corporaciones Autónomas Regionales, las Corporaciones de Desarrollo Sostenible, las Autoridades Ambientales Urbanas y la Unidad Administrativa de Parques Nacionales a partir de la Ley 99 de 1993 son las entidades encargadas de administrar, dentro del área de su jurisdicción, el medio ambiente y los recursos naturales renovables y propender por su desarrollo sostenible. Tienen como objeto la ejecución de las políticas, planes, programas y proyectos sobre medio ambiente

y recursos naturales renovables, así como dar cumplida y oportuna aplicación a las disposiciones legales vigentes sobre su disposición, administración, manejo y aprovechamiento (Ley 99 de 1993). Entre otras funciones se resalta en esta ley:

- *“Otorgar concesiones, permisos, autorizaciones y licencias ambientales requeridas por la ley para el uso, aprovechamiento o movilización de los recursos naturales...” (Ibíd.)*
- *“Ejercer las funciones de evaluación, control y seguimiento ambiental de los usos del agua ..., lo cual comprenderá el vertimiento, emisión o incorporación de sustancias o residuos líquidos, sólidos y gaseosos a las aguas en cualquiera de sus formas ..., así como los vertimientos o emisiones que puedan causar daño o poner en peligro el normal desarrollo sostenible de los recursos naturales renovables o impedir u obstaculizar su empleo para otros usos. Estas funciones comprenden la expedición de las respectivas licencias ambientales, permisos, concesiones, autorizaciones y salvoconductos;...” (Ibíd.)*
- *“Promover y ejecutar programas de abastecimiento de agua a las comunidades indígenas y negras tradicionalmente asentadas en el área de su jurisdicción en coordinación con las autoridades competentes” (Ibíd.)*
- *“Ordenar y establecer las normas y directrices para el manejo de las cuencas hidrográficas” (Ibíd.)*
- *“Promover y ejecutar obras de irrigación, avenamiento, defensa contra las inundaciones, regulación de cauces y corrientes de agua, y de recuperación de tierras que sean necesarias para la defensa, protección y adecuado manejo de las cuencas hidrográficas del territorio...” (Ibíd.)*

Estas funciones justifican a plenitud la necesidad de contar con evaluación regional del agua que se constituya en la base técnica para tomar decisiones pertinentes con respecto al recurso hídrico ya que reflejan la situación actual y tendencias en el estado y comportamiento del agua. En su desarrollo se evalúan datos, se genera información, se analiza integralmente y se genera el conocimiento necesario para una adecuada GIRH, a la vez que se evidencian vacíos que deben ser cubiertos con acciones de mejoramiento de la calidad de la información. Adicionalmente, la información sirve de apoyo en la aplicación de instrumentos económicos y en la elaboración y seguimiento de los planes ambientales y de gestión.

El sistema de información que se consolide a partir de la información, resultados y análisis de las ERA se convierte en un soporte fundamental del proceso de la gestión integrada del agua (GIRH) y un insumo para la evaluación nacional, el seguimiento de la PNGIRH y la toma de decisiones en los diferentes niveles.

1.3. Marco contextual

El IDEAM, con el propósito de lograr coherencia, pertinencia y eficiencia en el proceso de generación y uso de la información que se utiliza en los diferentes

niveles de toma de decisiones, reconoce la importancia y necesidad de consolidar un desarrollo conceptual y metodológico para las ERA que permitan superar deficiencias conceptuales y metodológicas e integrar información relevante que se encuentra dispersa.

En este contexto el IDEAM se alinea con los objetivos de la PNGIRH publicada en el 2010 para desarrollar las ERA con base en su aproximación conceptual y metodológica del ENA 2010 y los determinantes del Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014 (*Ley 1450 de 2011*) el marco normativo vigente y el proceso de planificación y ordenamiento ambiental del territorio. Así mismo reconoce y avanza con esta iniciativa en la consolidación del Sistema de Información del Recurso Hídrico SIRH integrado al Sistema de Información Ambiental (SIAC).

A continuación se presentan los principales aspectos de estos referentes en relación con las Evaluaciones Regionales del Agua:

1.3.1. Estudio Nacional del Agua 2010 como referente de evaluación del agua en Colombia

El Estudio Nacional del Agua 2010 se constituye en un referente nacional puesto que integra los resultados de la evaluación del agua en Colombia en los aspectos relacionados con oferta superficial y subterránea, uso y demanda, condiciones de calidad, y las afectaciones al régimen hidrológico por variabilidad y cambio climático. Es un documento con alto valor agregado, soportado en conceptos y metodologías replicables con bases de datos sistematizadas e integradas al Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH) que forma parte del Sistema de Información Ambiental (SIAC). Utiliza información oficial de series históricas de 34 años continuos de monitoreo, proveniente de la Red Hidrometeorológica Nacional (423 estaciones hidrológicas, 2.000 de precipitación y 389 climatológicas de la red del IDEAM y 30 estaciones de otras entidades), así como, series del monitoreo sistemático de variables de calidad que el IDEAM realiza en 154 puntos de muestreo en la red de calidad del agua. La información de sectores usuarios del recurso se obtiene del Sistema Estadístico Nacional del DANE y de estadísticas de los mismos sectores.

En términos generales, el ENA 2010 brinda insumos técnicos sobre la distribución y cantidad de agua, las características de las presiones por extracción y contaminación, las condiciones de calidad del agua y afectaciones al recurso hídrico por variabilidad y cambio climático. Evalúa los problemas vinculados al agua en las principales cuencas del país teniendo como unidades de análisis las 5 áreas, 41 zonas y 309 subzonas hidrográficas para condiciones hidrológicas de año medio, año seco y año húmedo. En aguas subterráneas el análisis se realiza sobre 16 provincias hidrogeológicas en que se ha dividido el país.

a nivel de cuencas abastecedoras de acueductos como indicativo de la vulnerabilidad al desabastecimiento que pueden tener las poblaciones de las cabeceras municipales del país. Considera un sistema de seis indicadores, dos relacionados con el régimen natural y cuatro de la relación con las actividades que reflejan el estado de las situaciones que son determinantes para la toma de decisiones en el marco de la Gestión Integral de Recursos Hídricos (GIRH) adoptado en la “Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico en Colombia” (MAVDT, 2010a).

1.3.2. Política Nacional para la Gestión Integral Recurso Hídrico en Colombia y Plan Hídrico Nacional

La PNGRH publicada en el 2010, adopta el concepto y alcance del *Comité Asesor Técnico del Global Water Partnership que reconoce* la GIRH como “un proceso cuyo objetivo es promover el manejo y desarrollo coordinado del agua en interacción con los demás recursos naturales, maximizando el bienestar social y económico resultante, de manera equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales” (GWP, 2000).

Este concepto demanda considerar el agua en todos sus estados dentro de su ciclo natural y la interdependencia de las aguas superficiales, subterráneas y marinas tal como se ilustra en el Capítulo 2 de este documento. Igualmente, define la cuenca hidrográfica como unidad espacial de análisis para los diferentes niveles de planificación y ordenamiento ambiental, teniendo como base la zonificación hidrográfica elaborada por el IDEAM.

En la PNGRH se reconocen sistemas claves que enmarcan los objetivos específicos para la GIRH: 1. Oferta; 2. Demanda; 3. Calidad; 4. Riesgos sobre la oferta; 5. Fortalecimiento institucional; y 6. Gobernabilidad. Las líneas de acción a desarrollar en cada uno de ellos, deberán priorizarse en atención a la severidad e importancia regional de los problemas y conflictos del agua, y de los recursos disponibles para su gestión.

La GIRH exige la implementación coordinada de los instrumentos requeridos para su planeación, administración, control y seguimiento; a través de los cuales interactúan los actores clave (usuarios, autoridades ambientales y entes territoriales) que deben garantizar la gobernabilidad de la cuenca.

1.3.3. Proceso de planificación, ordenamiento ambiental y del territorio

Los niveles de zonificación hidrográfica en el territorio colombiano corresponden a cinco áreas hidrográficas, 41 zonas hidrográficas y 309 subzonas hidrográficas que fueron delimitadas por el IDEAM en el 2010.

La PNGIRH determina los niveles para planificación, ordenamiento y manejo del agua en Colombia, para los cuales es determinante contar con el conocimiento e información en la resolución apropiada. Los niveles son los siguientes (Figura 1):

- *Cuencas objeto de planificación estratégica:* Corresponden a las cinco grandes áreas hidrográficas del país: Magdalena - Cauca, Caribe, Orinoco, Amazonas y Pacífico.
- *Cuencas objeto de instrumentación y monitoreo a nivel nacional:* Corresponde a las 41 zonas hidrográficas definidas por el IDEAM.
- *Cuencas objeto de ordenación y manejo:* Corresponde a las cuencas de nivel igual o subsiguiente al de las sub-zonas hidrográficas, en las cuales se formularán e implementarán, de manera priorizada, los planes de manejo y ordenación de cuencas (POMCA).
- *Cuencas y acuíferos objeto de plan de manejo ambiental:* Corresponde a las cuencas de orden inferior a las que son objeto de POMCA, así como a los acuíferos prioritarios que serán objeto de planes de manejo específicos.

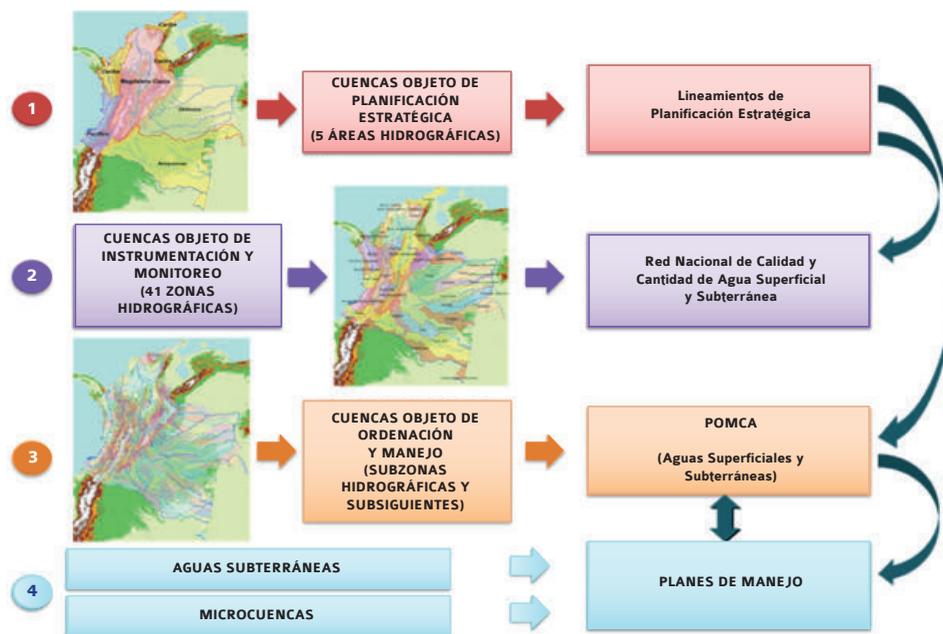


Figura 1. Estructura de Planificación de la PNGIRH

Fuente: (MAVDT, 2010a).

Las prioridades que plantea la política indican que la ordenación de cuencas está en función de las condiciones ecológicas, económicas y sociales que requieran este proceso, de acuerdo con los criterios que define el IDEAM. Cuando no se amerita POMCA la prioridad se da a los ecosistemas clave para el recurso hídrico que requieran de plan de manejo. Considera que para la administración del agua se debe partir de la ordenación del recurso para determinar sus usos e identificar los conflictos existentes o potenciales. Con base en los resultados de esta evaluación

se opta por reglamentar la corriente hídrica distribuyendo y asignando el caudal disponible y regulando los vertimientos correspondientes o se administra a través de concesiones de agua y permisos de vertimientos individuales.

1.3.4. Sistema de información ambiental - Componente SIRH

Se requiere contar con conocimiento básico e información obtenida sistémicamente sobre el agua y el recurso hídrico, que se oriente a lograr una gestión integrada del agua en el área de jurisdicción de las autoridades ambientales. Esta información debe enmarcarse dentro de los objetivos y estrategias de la política para facilitar el cumplimiento de la normatividad y sobretodo lograr avances en la sostenibilidad del uso y la protección de los ecosistemas que soportan el abastecimiento de actividades sociales y productivas en las regiones. En este sentido el Decreto 1323 de 2007 asigna responsabilidades al MADS, al IDEAM, al INVEMAR a las autoridades ambientales regionales y urbanas para implementar el Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH) (como parte del Sistema de Información Ambiental para Colombia [SIAC]) definiéndolo en su artículo 2 como “el conjunto que integra y estandariza el acopio, registro, manejo y consulta de datos, bases de datos, estadísticas, sistemas, modelos, información documental y bibliográfico Reglamentos y protocolos que facilita la gestión integrada de recurso hídrico.” De la misma manera en su artículo 1 postula que el SIRH “promoverá la integración de otros sistemas que gestionen información sobre el recurso hídrico en los ámbitos institucional, sectorial, académico y privado”.

De manera complementaria, el Decreto 303 de 2012 reglamenta el artículo 64 del Decreto Ley 2811 de 1974 en relación con el Registro de Usuarios del Recurso Hídrico para el componente de concesión de aguas y el componente de autorización de vertimientos.

La PNGIRH formuló y actualmente desarrolla instrumentos de información y conocimiento del recurso hídrico, como el Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico, y Sistema de Información del Recurso Hídrico. El esquema del modelo conceptual sobre el cual se desarrolla el subsistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH), como parte del Sistema de Información Ambiental para Colombia (SIAC), se presenta en el Capítulo 3 de esta primera parte del documento.

La toma adecuada de decisiones debe soportarse adicionalmente en un sistema de indicadores hídricos coherentes con los generados a nivel nacional pero pertinentes en el orden regional que permitirán una evaluación adecuada del comportamiento del agua y de su estado para hacer seguimiento de las condiciones actuales y posibles escenarios futuros. La generación y análisis sistemático de indicadores hídricos será un soporte importante en la toma de decisiones de corto, mediano y largo plazo.

1.3.5. Las ERA en el marco normativo e institucional

Las Evaluaciones Regionales del Agua deben satisfacer las necesidades de información y conocimiento para dar cumplimiento a la normatividad vigente expresada en leyes, decretos, resoluciones nacionales y regionales y acuerdos reglamentados. De igual forma deben generar los insumos y productos útiles para atender convenios internacionales multilaterales y bilaterales aprobados y ratificados por Colombia. En el anexo 1 se sintetiza el marco normativo base de las ERA.

En particular se espera que los insumos técnicos generados a partir de las evaluaciones regionales del agua sean útiles, entre otros, para:

- Cumplimiento de las funciones de las autoridades ambientales relacionadas con el agua.
- Consolidación del Sistema de Información Ambiental para Colombia (SIAC), Subsistema de Información del Recurso Hídrico y subsistemas de información regional para la gestión.
- Aplicación de normas técnicas para administrar, controlar y hacer seguimiento de la hidrología y recurso hídrico en las unidades hídricas que integran la jurisdicción de la autoridad ambiental.
- Ordenación de Cuencas (Planes estratégicos de Macrocuencas y los POMCA).
- La planificación y ordenamiento del uso del recurso (reglamentación de corrientes; concesiones y permisos de vertimiento) así como en instrumentos asociados al ordenamiento forestal, manejo de páramos, humedales, áreas protegidas, zonas secas, manglares, sistemas acuíferos, aguas marinas y costeras.
- Aplicación de instrumentos económicos como tasas por uso y tasas retributivas.

1.4. Alcance y naturaleza de las Evaluaciones Regionales del Agua

La Evaluación Regional del Agua permite la actualización permanente de información y conocimiento sobre el estado (en cantidad y calidad) y dinámica del agua en sus componentes de oferta y disponibilidad; uso y demanda; contaminación y condiciones de calidad; amenaza y vulnerabilidad. En este sentido, las ERA integran los componentes temáticos definidos en la PNGIRH atendiendo los requerimientos de la normatividad vigente y las necesidades técnicas que permiten el ejercicio de la autoridad ambiental (Figura 2). Los desarrollos temáticos y resultados se construyen sobre bases conceptuales y metodológicas que permiten la transferencia e integración de información y conocimiento. Estas evaluaciones deben promover el escalamiento de un sistema de indicadores regionales del agua que permitan reconocer el estado, las presiones y afectaciones del agua por actividades antrópicas o factores climáticos.

- Evalúan en forma comprensiva los sistemas hídricos, su dinámica e interacciones
- Se constituyen en un insumo técnico para la planificación, priorización de acciones y toma de decisiones en área de jurisdicción de las autoridades ambientales y en las unidades de análisis hídrico que la integran.
- Generan información en forma sistemática que facilita la articulación de los Sistemas de Información al interior de las autoridades ambientales, entre ellas y con las entidades nacionales.

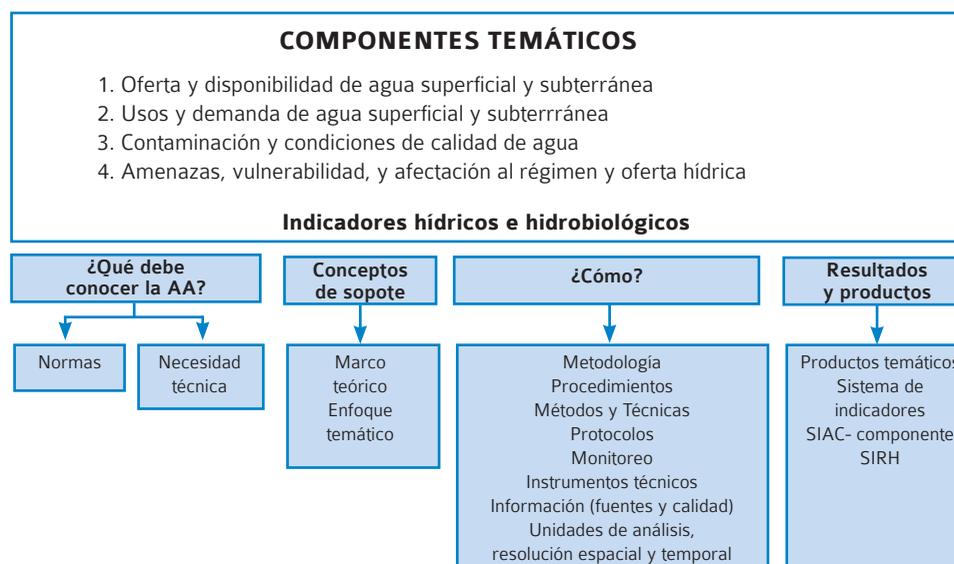


Figura 2. Esquema conceptual – metodológico de las ERA

El ámbito de aplicación es la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional o de la Autoridad Ambiental Urbana de las grandes ciudades con la participación de la Unidad de Parques Nacionales. Las unidades básicas de análisis son la cuenca hidrográfica y los sistemas acuíferos que integran las diferentes regiones del país y que la autoridad ambiental delimita para la gestión del agua en armonía con los niveles de planificación definidos en la PNGIRH.

La unidad hidrográfica de análisis para las ERA son las subzonas hidrográficas definidas en la zonificación del IDEAM, las cuencas subsiguientes a las que se refiere el MADS en la PNGIRH (reglamentadas en el decreto 1640 de 2012, artículo 3) y las unidades de menor nivel definidas en la zonificación hidrográfica de la autoridad ambiental para el ejercicio de sus funciones. La unidad de análisis para las aguas subterráneas serán los sistemas acuíferos que integran las 16 provincias hidrogeológicas identificadas en la zonificación hidrogeológica nacional definida por el IDEAM.

La ERA, en términos generales, es un proceso que articula metodologías, protocolos, entre otros, y que se orienta a generar información en forma sistemática para apoyar la planificación, gestión y aplicación de los demás instrumentos. Es importante resaltar que la información de oferta, demanda, calidad y riesgo son componentes básicos de la gestión de las autoridades ambientales, y que es necesario que esta información esté disponible y forme parte de los sistemas de información y de divulgación.





Capítulo 2

Marco conceptual

En este capítulo se presentan los elementos conceptuales básicos que orientan la evaluación de las características e interacciones de la oferta y la demanda para diferentes usos, las condiciones de calidad y de disponibilidad del recurso, y los riesgos asociados a la dinámica del agua y en las unidades hidrográficas que conforman las jurisdicciones de las autoridades ambientales en las regiones de Colombia.

Se expone el enfoque conceptual general de soporte para la construcción de las Evaluaciones Regionales del Agua, y el conjunto de indicadores hídricos que apoyan el análisis integral de la situación actual y de las tendencias.

2.1. Premisas conceptuales básicas

Los lineamientos conceptuales para la evaluación regional del agua consideran un marco teórico con el modelo básico para entender el funcionamiento de los sistemas hídricos y enfoques conceptuales propios de cada componente temático.

2.1.1. Marco teórico de respaldo

El modelo básico para entender el funcionamiento de los sistemas hídricos es el *ciclo hidrológico* y su *balance de agua* (Figura 3). La compleja interacción entre la atmósfera y los procesos superficiales y subsuperficiales afecta el régimen, la cantidad, la distribución y la calidad del agua en las diferentes unidades hidrográficas. Por ello, los componentes del ciclo hidrológico difieren en sus características químicas, bioquímicas, variabilidad espacial y temporal, resiliencia, vulnerabilidad a la presión (incluidos usos de la tierra y cambio climático), susceptibilidad a la contaminación y capacidad de proveer servicios ambientales apropiados para ser utilizados en forma sostenible (IDEAM, 2010).

El ciclo hidrológico de la Tierra es el mecanismo global que hace posible la transferencia de agua desde los océanos a la superficie y desde la superficie, o subsuperficie, y las plantas a la atmósfera que envuelve nuestro planeta; Las principales variables naturales de los procesos del ciclo hidrológico son:

precipitación, infiltración, escorrentía, evaporación y transpiración. Las actividades humanas (localización de asentamientos humanos, industria, ganadería, agricultura, entre otros) pueden alterar los componentes del ciclo natural mediante afectaciones del uso del suelo y a través de la utilización, reutilización y vertido de residuos en los recorridos naturales de los recursos hídricos superficiales y subterráneos (UNESCO, 2006a).

El análisis de los aspectos cuantitativos y cualitativos de los componentes del ciclo hidrológico en su expresión regional presupone un conocimiento e información sobre las fuertes variaciones que existen en las regiones del país, incluyendo precipitación, escurrimiento superficial, recarga de acuíferos y la calidad de los cuerpos de agua. Estas variaciones pueden describirse en la evaluación nacional basada en grandes cuencas hidrográficas o hidrogeológicas a gran escala teniendo en cuenta que tiene directa relación con la distribución temporal, la distribución espacial y las áreas de análisis utilizadas pero deben ser analizadas con mayor resolución, ya que la problemática del agua es predominantemente de tipo local. Esto es válido también para el conjunto de indicadores calculados a gran escala.

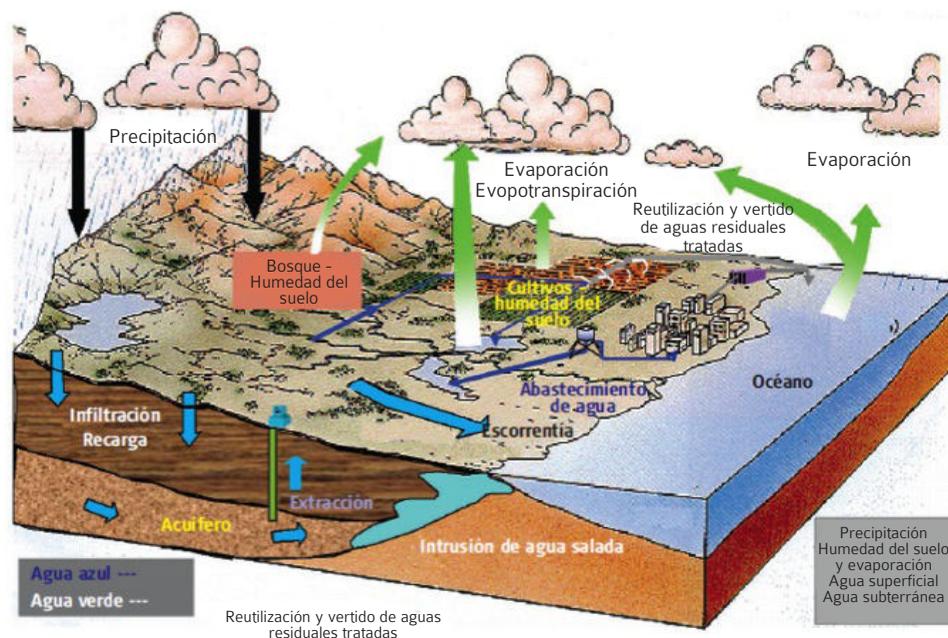


Figura 3. Ciclo hidrológico

Fuente: (UNESCO, 2006a).

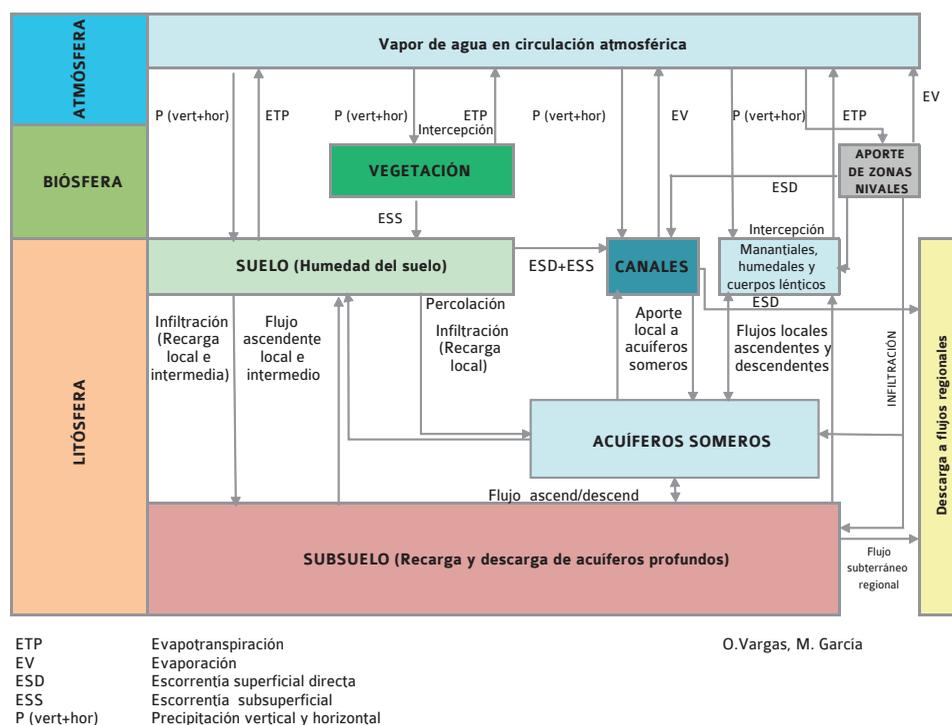


Figura 4. Procesos del ciclo hidrológico en páramos

Fuente:(García, 2010).

Aun cuando los procesos del Ciclo Hidrológico obedecen a relaciones complejas (Figura 4) entre los componentes del ecosistema que deben ser entendidas para la toma de decisiones, en la práctica se integran para expresarlas de manera cuantitativa y de esta forma derivar balances hídricos que representan la realidad de los flujos dominantes.

En concordancia con el marco conceptual del Estudio Nacional del Agua 2010, las Evaluaciones Regionales del Agua (ERA) se abordan desde el concepto de integralidad y enfoque sistémico de los ciclos y procesos de la naturaleza, y reconoce al agua como elemento estructurante del medio natural y decisivo en la dinámica de los procesos sociales y productivos. En este contexto se integran la oferta con los usos y aprovechamientos en *unidades hidrográficas que definen los sistemas hídricos* a escalas de mayor resolución que las requeridas en la evaluación nacional correspondientes a áreas, zonas y subzonas hidrográficas o provincias hidrogeológicas que se consideraron en el ENA 2010.

En este enfoque holístico de la GIRH es relevante en la evaluación regional enfatizar en la relación del agua con los ecosistemas y la sociedad. La Global Water Partnership en sus publicaciones hace énfasis en la necesidad de reconocer y generar conocimiento sobre la dependencia del agua que se comparte entre la humanidad y los ecosistemas (Falkenmark, 2003). El agua a través de sus muchas funciones juega múltiples roles en la dinámica de los ecosistemas y de los sistemas sociales. Es esencial como soporte de vida en el planeta, determinante en el funcionamiento

de los ecosistemas terrestres como medio de transporte de nutrientes y de hábitat de ecosistemas acuáticos. En los sistemas sociales tiene funciones fundamentales para el soporte de la población, producción de alimentos y de energía, medio de transporte, moderador del microclima, entre otros.

La base para la evaluación es la información y conocimiento sobre la interacción entre los diferentes componentes del ciclo del agua, teniendo en cuenta los procesos naturales y los procesos inducidos. Cualquier modificación de los procesos naturales, la mayoría directamente relacionados con el agua, tiene efectos e impactos sobre ecosistemas fundamentales en la conservación de la dinámica de procesos naturales en el ciclo hidrológico y su balance de agua en una región. En este contexto la relación e interacción del agua superficial, agua subterránea y marina es determinante en la evaluación del agua en las regiones.

A su vez la afectación de ecosistemas de páramo, bosque alto andino, humedales continentales y marinos y ecosistemas acuáticos altera la preservación de la dinámica de procesos naturales que intervienen en el ciclo del agua. Los ecosistemas cumplen un papel determinante en la regulación del flujo y almacenamiento de agua a la vez que favorecen los procesos de recarga de acuíferos e interacción entre los sistemas hídricos subterráneos y superficiales. En este marco conceptual la estructura básica para las evaluaciones regionales del agua y los estudios periódicos propuestos se presenta en la Figura 5.

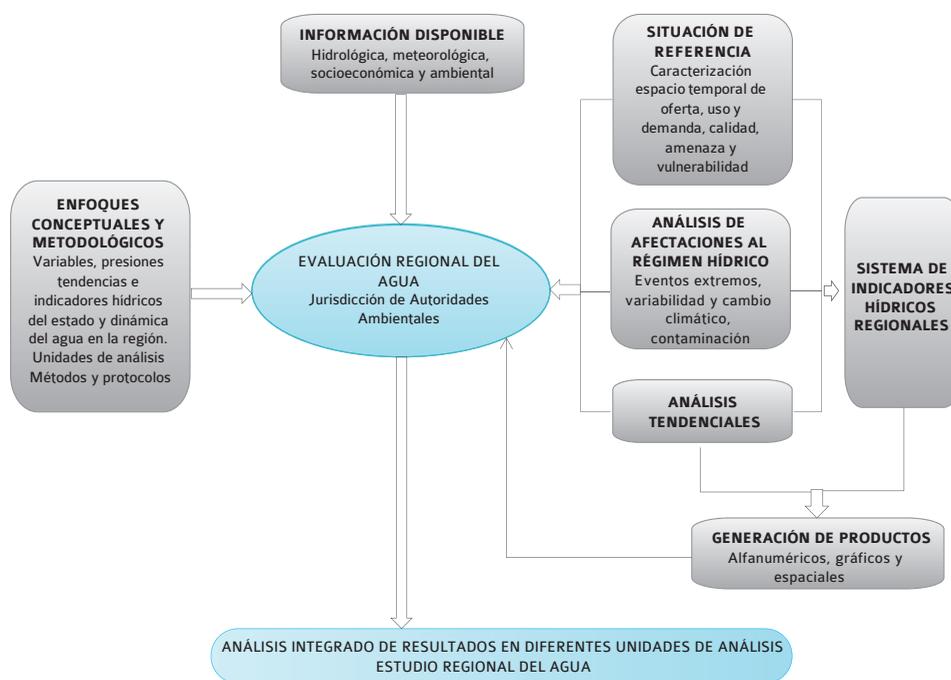
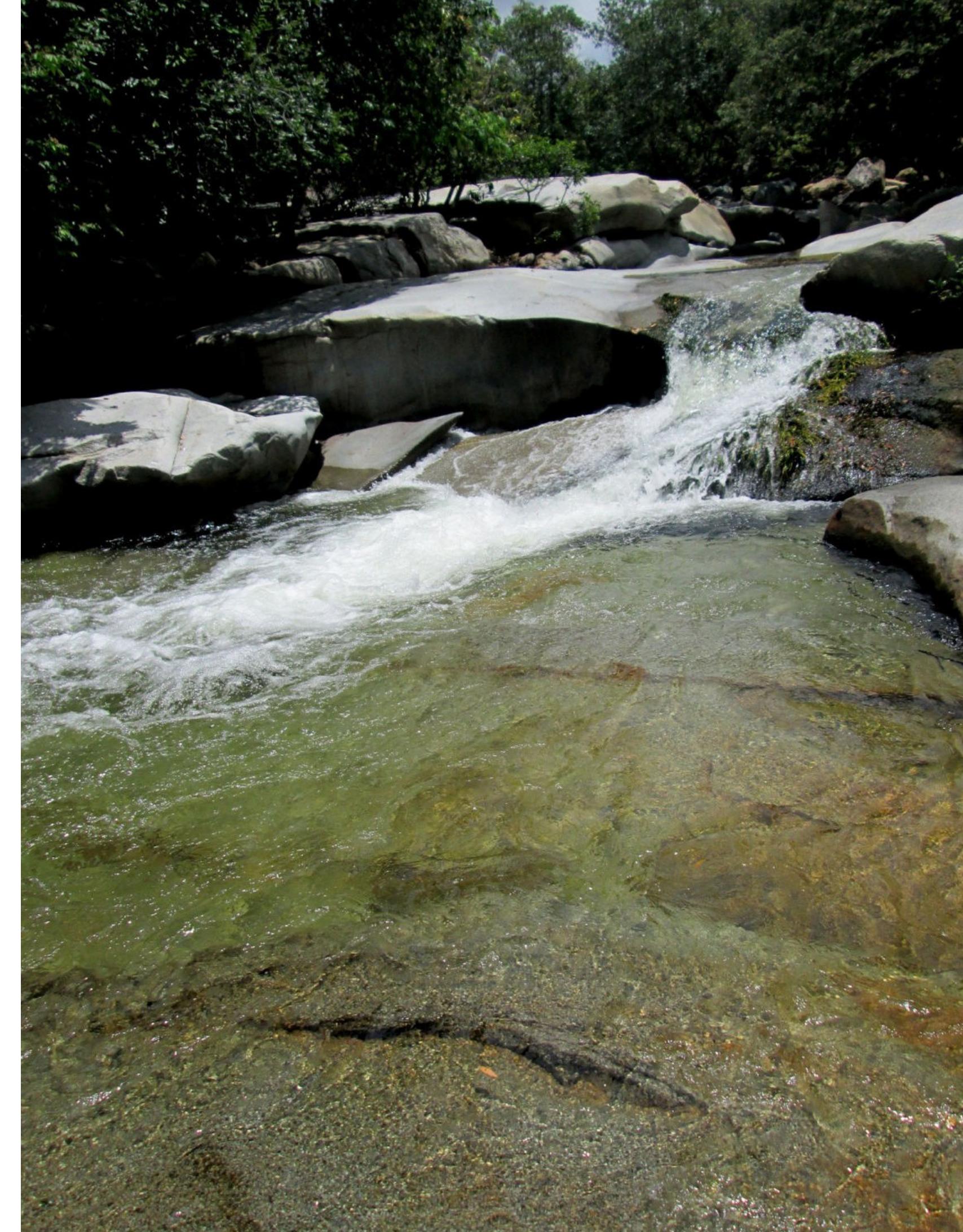


Figura 5. Estructura de las Evaluaciones Regionales del Agua (ERA)



de agua, calidad de agua, amenaza y vulnerabilidad de las fuentes hídricas y el recurso. Esta dinámica debe ser expresada con un sistema de indicadores hídricos regionales coherente con la funcionalidad del sistema, asequible y pertinente para la toma de decisiones.

La línea de referencia de las ERA soporta el análisis del comportamiento y estado del agua en el medio natural, para evaluar las presiones sobre la cantidad y calidad, producto de las acciones antrópicas y de los posibles efectos e impactos de eventos climáticos extremos o procesos globales, como el cambio climático. Se precisa una actualización periódica de las variables que debe ser publicada en Estudios Regionales del Agua y en los ambientes web de las autoridades ambientales para los diferentes usuarios que requieran de esta información para la oportuna toma de decisiones.

2.1.2. Enfoque conceptual temático

Los componentes de la ERA deben construirse sobre conceptos y metodologías acordados en el nivel nacional para garantizar su replicabilidad y utilidad en el flujo de información. En este sentido, se han dispuesto en este documento unos marcos conceptuales para cada componente que se presentan en la PARTE 2 de este documento. Esta integración de conceptos y metodologías fortalece los escenarios de gobernanza del agua y la base técnica del SINA permitiendo diálogos regionales y nacionales para la toma de decisiones a diferentes niveles.

2.2. Sistema de indicadores hídricos regionales

La caracterización de variables de oferta, demanda y calidad, y las correspondientes a alteraciones del régimen natural, permiten construir un sistema de indicadores hídricos que reflejan el estado de las situaciones que, en un enfoque sistémico con visión integral, son determinantes para la toma de decisiones en el marco de la Gestión Integral de Recursos Hídricos (GIRH)¹ adoptado en la "Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico en Colombia" (MAVDT, 2010a). La conceptualización de este sistema de indicadores se ilustra en la Figura 6. Se parte de unas condiciones de referencia que son afectadas por la intervención antrópica y procesos de transformación. Este cambio de condiciones determina las acciones que se deben tomar para garantizar la sostenibilidad del agua.

En términos generales, *un indicador* es la medida cuantitativa o la observación cualitativa que permite identificar cambios en el tiempo y cuyo propósito es determinar qué tan bien está funcionando un sistema, dando la voz de alerta sobre

¹ La evaluación de los recursos hídricos es un prerequisite para todos los aspectos relacionados con la planificación, desarrollo y gestión integrada del agua, y un elemento fundamental para la toma de decisiones. Constituye, a su vez, un factor coadyuvante en la gestión para la preservación del medio ambiente como parte del desarrollo sustentable (WMO, UNESCO, 1991).

la existencia de un problema y permitiendo tomar medidas para solucionarlo, una vez se tenga claridad sobre las causas que lo generaron (OECD, 2001). Un indicador es un dato, variable o parámetro, ya sea sencillo o compuesto, que más allá de lo que dice en sí mismo, permite describir un espectro de información adicional y permite deducir un conocimiento sobre el conjunto. (España, 2000).

La propuesta de *un sistema de indicadores* tiene que ver con la naturaleza, alcance y condiciones de viabilidad de los indicadores hídricos pertinentes, coherentes y asequibles en el contexto nacional y regional. Este conjunto de indicadores debe abordar el tema del agua en forma integral e integrada que obedezca a la lógica de procesos, relaciones e interdependencia entre las lecturas del nivel nacional, regional y coherencia con lo internacional. Como no todos los indicadores que se aplican a nivel nacional tienen una aplicación a nivel regional, la aproximación y definición de indicadores debe ser jerarquizada e instrumentada para cada uno de los niveles y para la interrelación. (IDEAM, 2009).

Para abordar el tema del agua como un elemento de síntesis del medio natural y sus interacciones con los demás elementos de la naturaleza y con las acciones antrópicas, el modelo que se utilizó en la evaluación nacional del agua, con el ENA 2010, considera la integralidad y enfoque sistémico del ciclo del agua. Este mismo modelo (Figura 6) se propone para la evaluación regional configurado a partir de la necesidad de tener cada vez mayor información pero al mismo tiempo información de síntesis que permita una lectura comprensible y científicamente válida de los fenómenos e interacciones derivadas de un conocimiento sobre el conjunto más allá de lo que el parámetro o indicador mismo puede decir.

Los indicadores hídricos regionales deben responder a preguntas básicas sobre qué se debe saber del agua, de interés para la toma de decisiones e información pública en general. En términos generales, la evaluación regional del agua debe responder a preguntas relacionadas con la situación actual y tendencias de la dinámica y estado del agua en las cuencas y unidades hídricas donde las autoridades ambientales deben realizar gestión integral del agua. Esta evaluación debe orientarse a dar respuesta a preguntas sobre la disponibilidad del recurso, restricciones por afectación a la oferta o a la calidad, determinar cuál es el uso y cómo se distribuye la demanda, cuáles son las condiciones de calidad de las fuentes hídricas y cuáles las presiones por extracción y por contaminación. Igualmente, debe responder cómo se afecta el régimen hídrico por variabilidad y cambio climático y, en general, cuáles son los problemas vinculados al agua prioritarios en las principales cuencas y sistemas acuíferos.



Figura 6. Modelo del Sistema de Indicadores Hídricos

Los indicadores regionales del agua deben satisfacer un dominio de variables suficientes para la toma de decisiones. Por ello, los indicadores propuestos en su conjunto e interacción responden, en gran medida, de manera sistémica, e integra lo que se requiere conocer del agua en las regiones. Esto implica que son indicadores replicables y sostenibles pero a su vez representativos del nivel de aplicación y consistentes en su estructura conceptual y metodológica.

A nivel nacional se definió un sistema de indicadores hídricos, en el ENA 2010, con seis índices. Dos de ellos son de régimen natural: Índice de Aridez (IA) e Índice de Regulación Hídrica (IRH). Los otros cuatro son de intervención antrópica: Índice de Uso del Agua (IUA), Índice de Afectación Potencial a la Calidad del Agua (IACAL), Índice de Vulnerabilidad Hídrica al desabastecimiento (IVH) y el Índice de Calidad del Agua (ICA). Estos índices definidos en el orden nacional se conservan a nivel regional con los ajustes metodológicos para llevarlos a la resolución pertinente y escalas mayores (IDEAM, 2010a).

El sistema de indicadores regionales está integrado por los seis índices definidos en el ENA 2010 mencionados y seis índices que complementan la evaluación en los temas de agua subterránea, condiciones de calidad, amenaza y vulnerabilidad de los sistemas hídricos y del recurso por variabilidad climática y contaminación (Figura 7). Este conjunto de indicadores hídricos dan cuenta del estado y dinámica del agua, las presiones, efectos en la disponibilidad de la variabilidad hidrológica y deben aplicarse a cada unidad de análisis definida por la autoridad ambiental. Los indicadores hídricos que conforman el sistema se dividen en indicadores de

sistema hídrico natural e indicadores de intervención antrópica. En este sentido se incorporan al dominio regional los seis indicadores del Estudio Nacional del Agua y se complementa el análisis con nuevos indicadores pertinentes en el nivel regional.

En la Figura 7 se presenta el conjunto de indicadores propuesto y el proceso de validación en que algunos de ellos se encuentran para ser implementados en las regiones.

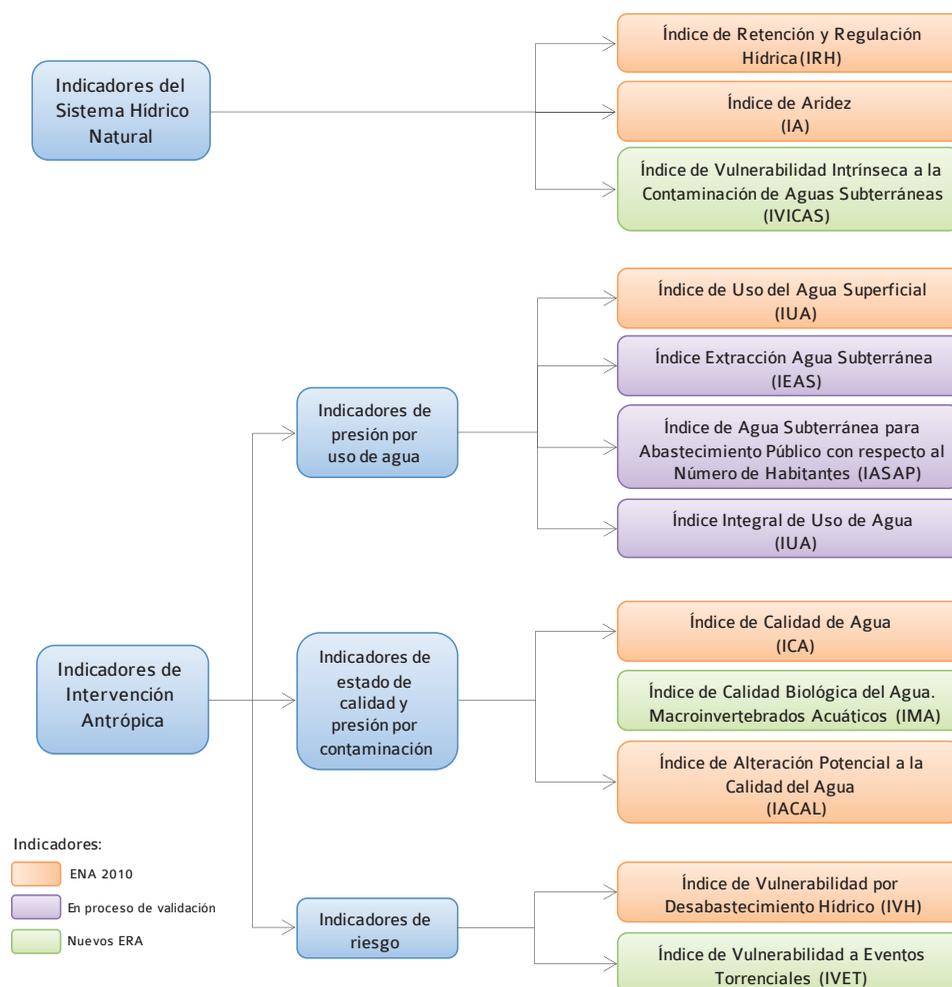


Figura 7. Sistema de Indicadores Hídricos Regionales

Los conceptos, metodologías, procedimientos y fuentes de información se desarrollan en la Parte III de este documento.





Capítulo 3

Marco metodológico de las ERA

Los elementos metodológicos de las ERA y de los estudios regionales del agua deben responder a dos tipos de requerimientos: en primer lugar a aquellos que están definidos en la normatividad vigente; y en segundo lugar, a requerimientos que aun cuando no se han contemplado en las normas son necesarios para la evaluación integral del agua como base de la gestión del recurso. De estos últimos, algunos vienen revisándose para su posterior reglamentación.

Los requerimientos normativos deben ser satisfechos mediante herramientas técnicas orientadas a la evaluación, administración, uso o manejo sostenible del recurso hídrico. El desarrollo y aplicación de evaluaciones regionales del agua permitirá, por lo tanto, reconocer vacíos en la normatividad jurídica y en la normalización técnica que podrán ser cubiertas mediante acciones nacionales o regionales según sea el caso.

En este capítulo se hace referencia a elementos metodológicos transversales que incluyen el procedimiento general, instrumentos y sistemas de información y estadísticos de soporte. Los elementos propios de cada componente se abordan en la Parte II de este documento.

3.1. Procedimiento general para la evaluación del agua en las regiones

Para lograr la evaluación del estado, dinámica y tendencias de los sistemas hídricos en las regiones como insumo técnico para la planificación, gestión y toma de decisiones sobre el agua, se propone el esquema metodológico básico que se presenta en la Figura 8.

Los resultados del proceso de evaluación regional del agua se agrupan en tres grandes áreas:

- El enfoque conceptual y metodológico general, referente de los componentes temáticos relacionados con los objetivos específicos de la PNGIR.

- La caracterización y el análisis de cada componente basado en conceptos y métodos propios de la temática y sus especificidades regionales, en los temas de oferta hídrica superficial y subterránea; el uso y demanda de agua, las condiciones de calidad, las amenazas y vulnerabilidad de los sistemas hídricos a variabilidad y cambio climático, así como a procesos de contaminación.
- El análisis del estado del agua, situación de referencia y tendencias, en cantidad y calidad a partir del conjunto de indicadores hídricos y de los diferentes productos generados en el proceso de evaluación, teniendo como unidades básicas de análisis las cuencas, los sistemas acuíferos y ecosistemas que conforman las regiones que administran las autoridades ambientales.

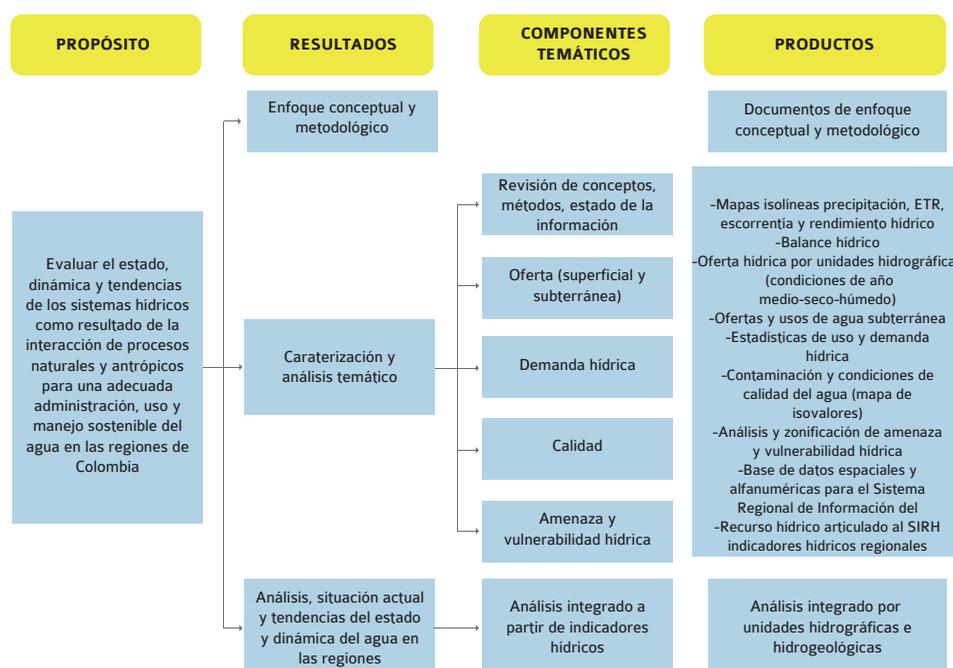


Figura 8. Esquema metodológico para la Evaluación Regional del Agua

3.2. Instrumentos

Las ERA están mediatizadas por instrumentos algunos de los cuales nutren sus resultados y otros que aplicarán los mismos. En términos generales estos instrumentos obedecen a dos situaciones diferentes:

- Instrumentos contemplados en la normatividad vigente.
- Instrumentos no contemplados aún en la normatividad vigente, algunos en proceso de reglamentación de las normas vigentes y otros en revisión o desarrollo para luego ser incorporados.

Estos instrumentos en términos generales pueden ser técnicos, de planificación y económicos.

3.2.1. Instrumentos técnicos

Los instrumentos técnicos permiten materializar la conceptualización técnica de la evaluación regional del agua y su implementación a través de programas, guías metodológicas, protocolos, herramientas de captura de información, normas técnicas, documentos de apoyo, entre otros. Entre los instrumentos identificados de utilidad particular en el proceso permanente de construcción de las ERA se encuentran:

Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico y la estrategia para su implementación.

El Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico (PNMRH) se constituye en la principal herramienta para las ERA, que busca la integralidad y complementariedad en el monitoreo de las principales variables de seguimiento del estado en cantidad y calidad del agua. Considera el monitoreo en los diversos estados dentro del ciclo hidrológico: aguas meteóricas (precipitación, evaporación); aguas superficiales (ríos, lagos, mares); aguas subterráneas (acuíferos).

La PNGIRH pretende entre otras cosas homologar el proceso de obtención de datos en cada uno de los diferentes niveles (nacional, regional o local) para que tengan igual significado. Asimismo, se vislumbra la necesidad de homologar métodos y procedimientos de muestreo, medición, procesamiento, validación, almacenamiento y difusión de los datos a nivel regional y nacional, entre las distintas entidades que realizan actividades de monitoreo.

En el marco de la PNGIRH (MAVDT, 2010b), y en particular con las estrategias para el logro de los objetivos 1 y 3², se precisa el objetivo general para el Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico: *“formular y ejecutar un plan integrado de monitoreo del recurso hídrico que permita conocer la cantidad y calidad del mismo a nivel nacional, regional y local, con la participación y responsabilidad de las autoridades ambientales de estos niveles, con protocolos compartidos y bajo la coordinación de la autoridad nacional, con el fin de garantizar la calidad de la información generada”* (IDEAM & MAVDT, 2010b).

2 Objetivo 1. OFERTA: Conservar los ecosistemas y los procesos hidrológicos de los que depende la oferta de agua para el país.

Objetivo 3. CALIDAD: Mejorar la calidad y minimizar la contaminación del recurso hídrico.

El IDEAM y el MADS fijarán en el corto plazo los referentes del Programa Nacional de Monitoreo con el propósito de “Ajustar el Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico y la determinación de la estrategia de su implementación, respondiendo a los indicadores ambientales de seguimiento del recurso hídrico y un estudio de reingeniería de la red, el cual debe definir la red básica nacional para el monitoreo del recurso y las necesidades de infraestructura para llevar a cabo su implementación” (IDEAM & MAVDT, 2010b).

El Programa tiene como referente básico los avances del IDEAM en materia de diseño y optimización de la red básica y los protocolos para el seguimiento y monitoreo del agua en la “Guía y protocolos del monitoreo y seguimiento del agua”, cuya versión final se encuentra en la página web del IDEAM.

La estandarización en el protocolo de monitoreo y seguimiento del agua abarca las diferentes fases del flujo de la información, desde el diseño de la red de observación y medición hasta la divulgación, incluyendo el procesamiento, validación, almacenamiento y difusión de los datos a nivel nacional y entre las distintas entidades que realizan actividades de monitoreo.

Los protocolos consolidados abordan el monitoreo de las variables de los componentes de oferta de agua superficial (precipitación, temperatura, evaporación, niveles y caudales), calidad (sedimentos y variables físico-químicas), aguas subterráneas y agua marino-costeras.

Adicionalmente esta guía incorpora el protocolo para el *monitoreo de los vertimientos en aguas superficiales y subterráneas* en concordancia con en el Decreto 3930 de 2010.

Registro de usuarios del recurso hídrico

El registro de usuarios es un instrumento diseñado para consolidar la información de concesiones de agua y permisos de vertimiento, estandarizando la información básica requerida para el otorgamiento de los mismos en las autoridades ambientales, en el marco de los decretos 1324 de 2007 y 303 de 2012, ofreciendo la información que soporta la asignación de los mismos y que cumpla con algunas de las premisas de un registro administrativo (IDEAM & MAVDT, 2011a).

La información objeto de recolección a través de este instrumento, en la medida que disminuya el subregistro y se encuentre disponible la información en el sistema de información ambiental y regional, se constituye en soporte fundamental para la evaluación permanente del agua en las regiones en relación con los componentes de demanda, calidad e indicadores hídricos, puesto que permite agregar información desde el usuario relacionada con localización de sitios de captación y usos del agua.

Formulario Único de Inventario de Aguas Subterráneas (FUNIAS)

El IDEAM en coordinación con el MAVDT y el Ingeominas diseñó y concertó con las autoridades ambientales el FUNIAS, el cual se acompaña de un instructivo para su diligenciamiento. A su vez, se desarrolló un aplicativo para que las autoridades ambientales almacenen, procesen y transfieran la información a los usuarios y al IDEAM como líder del SIRH.

De esta manera, se espera contar con un sistema de administración de datos e información de aguas subterráneas provenientes de inventarios de puntos de agua, definir estándares y mecanismos de intercambio de información y priorizar atributos de información de aguas subterráneas que permitan construir indicadores nacionales y regionales, reportes y alertas.

El formulario recaba información de los puntos de agua (entendidos estos como lugares u obras civiles que permiten el acceso directo o indirecto a un acuífero determinado) relacionados con localización, usos, características de diseño y construcción, volúmenes de extracción, calidad del agua y fuentes de contaminación, entre otros.

Las herramientas de captura de información (FUNIAS) y el aplicativo desarrollado se han entregado a las autoridades ambientales para que se adelanten campañas de inventarios de puntos de aguas subterráneas y se incorpore la información al SIRH de los sistemas acuíferos correspondientes.

Guías para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico

Desde el MADS se prevé la publicación y reglamentación de guías relacionadas con la planificación, ordenamiento y manejo del recurso hídrico que en términos generales corresponden a:

- Guía Técnico-científica para la Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas.
- Guía para los Planes de Ordenación del Recurso Hídrico (PORH).
- Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico.
- Guía para la elaboración de planes de manejo ambiental de acuíferos.
- Guía para la elaboración de planes de manejo de microcuencas.

Normas legales

Los instrumentos y normas técnicas para la GIRH soportan la regulación, el control ambiental y la administración del agua. En el Anexo 1 se relacionan las normas más relevantes. También son instrumentos técnicos las resoluciones regionales que expiden las autoridades ambientales con soporte base en la normatividad nacional y que contienen metodologías específicas, límites permisibles de variables ambientales, entre otros.

3.2.2. Instrumentos de planificación

Las ERA deben enmarcarse y a la vez constituirse en insumos técnicos para los diferentes modelos, referentes, orientaciones y acciones de planificación que se han definido desde el Plan Nacional de Desarrollo³ y la PNGIRH.

En este sentido, la PNGIRH reconoce un nivel de Planificación Estratégica de las cinco grandes áreas hidrográficas (macrocuencas); los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas (POMCA) para subzonas hidrográficas o subsiguientes, planes de manejo ambiental para cuencas de orden inferior a subzonas hidrográficas o subsiguientes y Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos.

A su vez, deben referenciar los planes de acción de las Autoridades Ambientales, tales como: Plan de Gestión Ambiental Regional (PGAR), Plan de Acción Trienal (PAT) y Plan Operativo Anual (POA). Así mismo, los planes de las entidades territoriales en los que tienen injerencia las autoridades ambientales como los de Ordenamiento Territorial (Ley 388, 1997), saneamiento y manejo de vertimientos municipales (PSMV), ahorro y uso eficiente del agua (Ley 373, 1997), entre otros.

3.2.3. Instrumentos económicos

Los instrumentos económicos de mayor significancia para las ERA apuntan a apoyar la regulación del uso y condiciones de calidad del agua, son la tasa retributiva y la tasa por utilización de agua, consignadas en la Ley 99 de 1993, artículos 43 y 42 respectivamente. Estos dos temas han tenido un proceso de reglamentación y evaluación de la misma por parte del Ministerio con desarrollos y soportes técnicos de respaldo.

La Ley 99, en su artículo 42, define las tasas retributivas que deben pagar los usuarios por el efecto nocivo causado sobre los recursos naturales, cuando son usados para la disposición de residuos. En el mismo artículo se definen los factores a tener en cuenta para el cálculo de la tasa. Este artículo 42 fue reglamentado por el Decreto 901 de 1997 en cuanto a las tasas retributivas por vertimientos puntuales y la definición del procedimiento de cálculo de sus tarifas. En el mismo año, mediante la Resolución 273 de 1997, el MAVDT determinó que los parámetros básicos para iniciar el cobro de la tasa retributiva serían la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST) y definió la tarifa mínima a cobrar por estos parámetros (IDEAM, 2011a).

El MAVDT (ahora MADS) realizó una Evaluación Nacional al Programa de Tasas Retributivas por Vertimientos Puntuales (MAVDT, 2002) y con base en sus análisis y resultados expide el Decreto 3100 de 2003, que reemplaza el Decreto 901 de 1997, con modificación posterior de algunos artículos con el Decreto 3440 de

2004. La reglamentación vigente que establece el cobro de tasas retributivas a los usuarios⁴ por la utilización directa e indirecta del recurso hídrico como receptor de vertimientos puntuales directos o indirectos y sus consecuencias nocivas, originados en actividades antrópicas o propiciadas por el hombre y actividades económicas o de servicios, sean o no lucrativas, es el Decreto 2667 de 2012, y deroga los Decretos 3100 y 3440.

En relación con el uso, el artículo 43 de la Ley 99 de 1993, reglamentado por el Decreto Nacional 155 de 2004, faculta al Gobierno nacional para establecer el cobro de una tasa por la utilización del agua, cuyos recursos se destinan al pago de los gastos de protección y renovación de los recursos hídricos. El artículo 216 de la Ley 1450 de 2011 del Plan Nacional de Desarrollo “Prosperidad para Todos” especifica la destinación de los recursos recaudados a través de la Tasa por Uso del Agua (TUA). El artículo 211 de la Ley 1450 de 2011 modificó y adicionó el artículo 42 de la Ley 99 de 1993, así: “Las tasas retributivas y compensatorias se aplicarán incluso a la contaminación causada por encima de los límites permisibles sin perjuicio de la imposición de las medidas preventivas y sancionatorias a que haya lugar. El cobro de esta tasa no implica bajo ninguna circunstancia la legalización del respectivo vertimiento”.

3.3. Sistema de Información Ambiental – Componente SIRH

Desde el Decreto Ley 2811 de 1974, se plantea la organización de un sistema de información ambiental que incluya además de la información de recursos naturales renovables y del ambiente, la información legal como concesiones, autorizaciones y permisos para uso de recursos naturales de dominio público y menciona el registro y los censos.

Además de la Ley 99 de 1993, los planes de desarrollo y las normas que respaldan las funciones del IDEAM, en relación con el Sistema de Información Ambiental (SIA), en el Decreto 1323 de 2007 (artículo 7) se señala que el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) tiene por competencia coordinar el SIRH, definir la estrategia de implementación y fijar los mecanismos de transferencia de información, así como el de compilar la información a nivel nacional, la operación de la red básica nacional de monitoreo y la gestión y procesamiento de datos. Para ello este mismo Decreto determina que el SIRH debe funcionar como el conjunto de elementos que integra y estandariza el acopio, registro, manejo y consulta de datos, bases de datos, estadísticas, sistemas, modelos, información documental y bibliográfica, reglamentos y protocolos que facilitan la gestión integral del recurso hídrico.

⁴ Es toda persona natural o jurídica, de derecho público o privado, que realiza vertimientos puntuales en forma directa o indirecta al recurso hídrico.

La construcción del SIRH se constituye en un proceso en el que intervienen el MADS, el IDEAM y las autoridades ambientales, que de manera coordinada deben adelantar acciones para consolidar de forma sistemática toda la información hídrica del país que permita lograr una gestión integrada del agua y a su vez responder a los objetivos planteados en dicho decreto:

- Proporcionar la información hidrológica para orientar la toma de decisiones en materia de políticas, regulación, gestión, planificación e investigación.
- Consolidar un inventario y caracterización del estado y comportamiento del recurso hídrico en términos de calidad y cantidad.
- Constituir la base de seguimiento de los resultados de las acciones de control de la contaminación y asignación de concesiones, con base en reportes de las autoridades ambientales.
- Contar con información para evaluar la disponibilidad del recurso hídrico.
- Promover estudios hidrológicos, hidrogeológicos en las cuencas hidrográficas, acuíferos y zonas costeras insulares y marinas.
- Facilitar los procesos de planificación y ordenación del recurso hídrico.
- Constituir la base para el monitoreo y seguimiento a la gestión integral del recurso hídrico.
- Aportar información que permita el análisis y la gestión de los riesgos asociados al recurso hídrico.

3.3.1. Elementos conceptuales del SIRH

El SIRH se desarrolla con base en el mapa conceptual que se presenta en la Figura 9. En este esquema se relacionan los componentes del SIRH que sirven de guía a las autoridades ambientales para el ajuste e implementaciones de sistemas regionales:

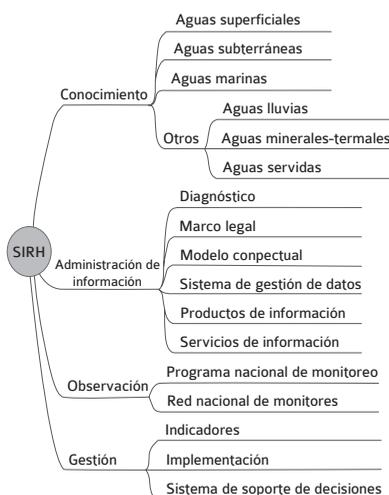


Figura 9. Síntesis elementos conceptuales del Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH)

Esta información debe atender los lineamientos y estrategias de política con el fin de lograr avances en la sostenibilidad del uso y la protección de los ecosistemas que soportan el abastecimiento de actividades sociales y productivas en las regiones. Asimismo, debe servir de insumo para un sistema de indicadores hídricos que faciliten la toma de decisiones a nivel regional y nacional, y que permitan una evaluación adecuada del comportamiento del agua, de su estado, y hacer seguimiento de las condiciones actuales y posibles escenarios futuros.

En este sentido se han establecido avances en la conceptualización de modelos de datos, listas controladas y diseño de instrumentos de captura de información dentro del SIRH que en un proceso de recolección sistemática de información debe permitir la caracterización y análisis de la oferta hídrica, la demanda de agua como indicativo de la presión por el uso, las condiciones de calidad, la afectación por variabilidad y efectos del cambio climático y los avances en gestión en una región. En el marco de las Evaluaciones Regionales del Agua, es necesario que la autoridad ambiental, de acuerdo a su estado de avance y capacidades, realice la estructuración, depuración y estandarización de datos, atendiendo las recomendaciones de atributos mínimos del SIRH, y como producto primordial, implemente su sistema de información que le permita dar continuidad a los procesos de análisis de la información, tomar decisiones sobre el manejo que debe darle al agua y generar acciones de conservación y uso sostenible del recurso.

Conocimiento: el SIRH plantea la necesidad de diseñar instrumentos de captura de información para “Conocer” e inventariar las aguas superficiales (estuario, arroyo, ciénaga, canal, caño, embalse, jaguey, lago o laguna, mar, pantano, quebrada o río), aguas subterráneas (acuíferos a través de pozos, aljibes o manantiales), puntos de captación de aguas lluvias (a través de techos, terrazas o zonas pavimentadas), minerales o termales y aguas servidas, para las cuales se requiere registrar datos sobre la oferta, usuarios que demandan el recurso, sus condiciones de calidad y riesgos asociados a desabastecimiento e inundaciones.

Administración: con la información mencionada, la entidad estaría en condiciones para ofrecer un “Diagnóstico” de sus recursos hídricos, determinar el nivel de cumplimiento de sus acciones en relación a lo estipulado en el marco legal nacional (Anexo 1) y emprender acciones, establecer o mejorar sus procesos de “Gestión de datos” mediante la integración de formatos, protocolos y guías, así como el fortalecimiento de sus capacidades en infraestructura tecnológica, instrumentos de medición y recursos humanos. Establecido un proceso de gestión de información, la autoridad ambiental podrá construir “Productos de información” requeridos por usuarios internos para la ejecución de tareas técnicas y de investigación, atender consultas del público general y a su vez responder adecuadamente en eventos de auditoría adelantados por los entes fiscalizadores del país.

Observación: se refiere a aquellos datos, en el marco del Programa Nacional de Monitoreo, asociados con información hidrológica, hidrogeológica, meteorológica y de calidad de agua obtenidos en las *estaciones de observación y seguimiento de*

las variables que constituyen una base fundamental para el conocimiento sobre el estado y dinámica del agua y su gestión integral. En tal sentido, la autoridad ambiental debe identificar vacíos de información para fortalecer su red de estaciones, si la tiene, con nuevos puntos que sean representativos, pertinentes, confiables y oportunos⁵; o articular su trabajo con otros actores que realizan tareas de monitoreo del recurso hídrico como el IDEAM o empresas privadas dispuestas a compartir información. En cuanto al monitoreo de aguas subterráneas el IDEAM ha dado los lineamientos para el establecimiento de una red de monitoreo de puntos de aguas subterráneas, que incluye los criterios de selección de puntos.

Gestión: la autoridad ambiental debe mantener documentación de las acciones adelantadas en relación con la planeación y gestión de las fuentes hídricas, indicando el nivel de priorización definido para su ordenamiento (Decreto 3930 de 2010, Decreto 1640 de 2012). En tal sentido, para Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico se requiere tener el registro de los usos permitidos en cada fuente y tramo, los objetivos y metas de calidad, las actividades planeadas en función de la prospectiva de una fuente, favorable o desfavorable, indicando el plan de legalización de usuarios, la implementación de Programas de Uso Eficiente y Ahorro del Agua (PUEAA), requerimientos de obras de control de caudal, cobro de la TUA, canalización de vertimientos, entre otros.

En relación a Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas, es necesario mantener la información sobre las configuraciones realizadas en la plataforma institucional y logística de la autoridad ambiental para sus procesos de ordenación de cuencas. Es decir, se debe indicar el equipo de trabajo, hacer una relación de actores institucionales y personales con sus roles y responsabilidades, identificar y documentar el estado de los conjuntos de datos que servirán de insumo en el proceso y elaborar un plan operativo del desarrollo del plan que incluya: i) estrategias institucionales, administrativas, financieras y económicas, ii) programas y proyectos, y iii) la definición de indicadores y metas con las cuales podrá hacerse el seguimiento a la implementación del plan.

3.3.2. Funcionamiento del SIRH

Para operar y generar productos de interés nacional, el SIRH requiere una serie de interacciones con sistemas nacionales que le permitan conformar una visión general del comportamiento del agua dentro de las actividades de las poblaciones y sectores económicos, pero principalmente requiere establecer canales de intercambio de datos con las autoridades ambientales, pues son estas las que, en cumplimiento de sus funciones deben mantener información actualizada sobre las condiciones del agua en su jurisdicción. El esquema de la Figura 10 ilustra sobre las relaciones y componentes del SIRH.

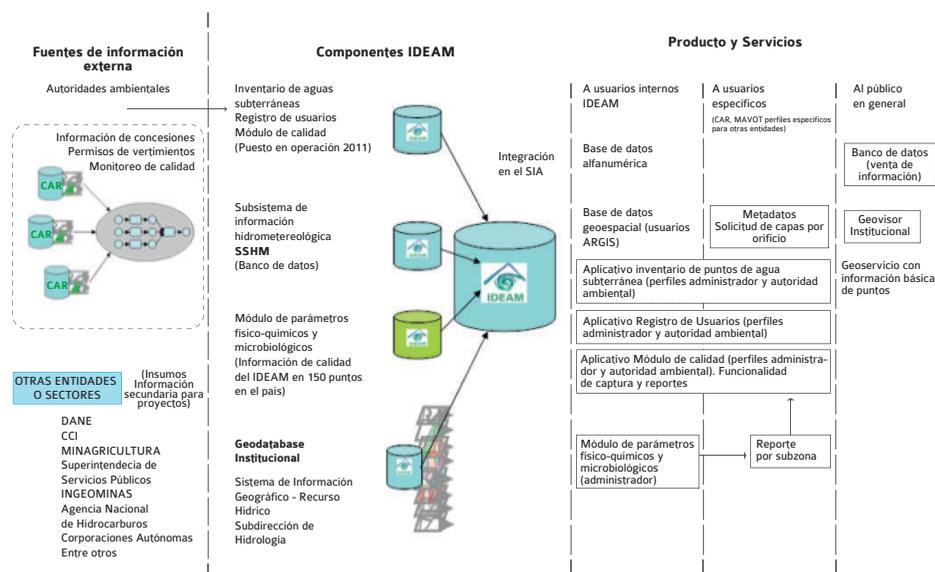


Figura 10. Componentes del Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH).

Fuente: (IDEAM & MAVDT, 2011b).

El proceso parte de las autoridades ambientales, de quienes se espera que, a medida que consoliden y estandaricen la información, reporten sus datos al IDEAM para que se adelanten las respectivas validaciones y se generen productos de información de ámbito nacional útiles a diferentes usuarios: tomadores de decisión, comunidad académica y público en general. Lo anterior sin afectar la autonomía e independencia de las autoridades ambientales.

Asimismo, en el gráfico (Figura 10) se muestra el IDEAM como articulador importante en el sistema, participa proporcionando datos de escala nacional como lo es la información gestionada en el Sistema de Información de Hidrología y Meteorología (SISDHIM), donde se captura, procesa, y se facilita la consulta de información sobre la oferta obtenida de la red nacional de estaciones meteorológicas e hidrológicas, soporte en la ERA para articular el componente de cantidad del SIRH. En relación con información sobre calidad del agua, el IDEAM comparte con el SIRH datos recopilados en la Red Básica de Calidad, la cual adelanta el monitoreo sistemático en más de 150 estaciones distribuidas en las 11 áreas operativas del Instituto y con las que se realizan análisis físico-químicos sobre afectación por vertimientos domésticos, industriales, actividad agrícola y minería.

De esta forma, todos los actores del SIRH se integran al Sistema de Información Ambiental (SIA), en cumplimiento de las disposiciones del Decreto 1600 de 1994, donde se indica que el IDEAM es el encargado de dirigir y coordinar todas las tareas asociadas a la gestión de datos, las bases de datos, las estadísticas, la información, los sistemas, los modelos, la información documental y bibliográfica, las colecciones y los reglamentos y protocolos que regulen el acopio, el manejo de la información y sus interacciones.

De acuerdo con lo anterior, el SIRH promueve el trabajo en red y colaborativo con el fin de que se facilite el uso de la información y se optimicen los recursos invertidos en recopilar, validar y procesar datos, y de esta forma difundir transparentemente las actividades que adelantan todos los actores para consolidar y mejorar la calidad de los datos.

Dicho trabajo en red requiere que cada autoridad ambiental funcione como un nodo gestionado a través de profesionales responsables de custodiar sus datos, garantizar su calidad y su disponibilidad, así como compartir experiencias, tecnología y proveer cooperación a través del intercambio de información. Por otra parte, es necesario que las autoridades ambientales participen en la identificación de actores institucionales y locales (artículo 11 del Decreto 1640 de 2012), que requieren mantenerse informados sobre el tipo de decisiones e investigaciones que se adelantan en su región, y aquellos que intervienen en tareas de recopilación y validación de información, investigación o gestión. De esta forma el país conocerá quiénes son los encargados de proveer datos, quiénes son sus usuarios, y determinar cuáles son los mejores mecanismos de proveer información.

Datos desde las autoridades ambientales

De acuerdo con las fases de documentación que se presentan en el gráfico (Figura 11), una vez establecido el inventario de fuentes hídricas subterráneas y superficiales con sus respectivos tramos (con sus datos de longitud, usos permitidos, tipo de flujo, georeferenciación inicial y final), la autoridad ambiental puede iniciar el proceso de relación de usuarios del agua con los datos de sus predios, la información de los actos administrativos y notificaciones surtidas en el proceso, las características de las captaciones y los detalles sobre la destinación del uso autorizado de cada captación.

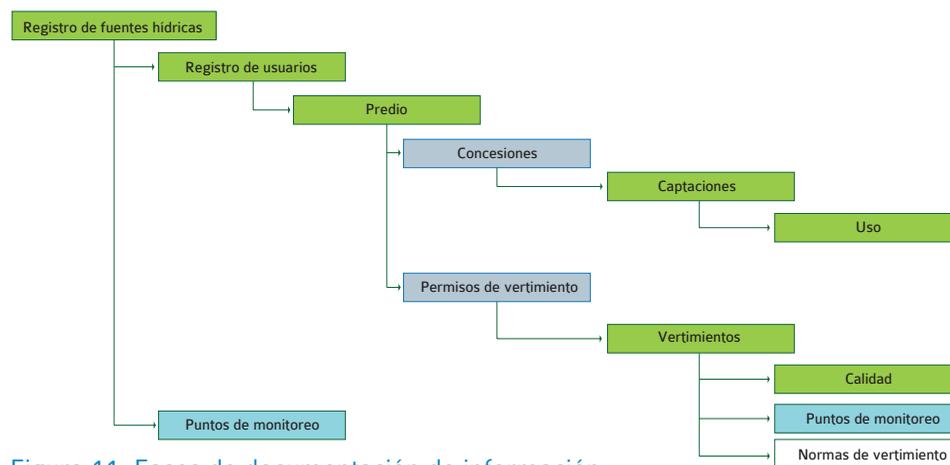


Figura 11. Fases de documentación de información

Fuente: (IDEAM, 2011).

Es de mencionar que para realizar el inventario de fuentes de agua subterránea, el IDEAM validó con las autoridades ambientales en el año 2009 el FUNIAS, que también se constituye en una recomendación para que las autoridades recopilen información en campo y sea implementado dentro de sus sistemas de información, con la claridad de que con este se recopila información de puntos legales y de aquellos que se encuentran en proceso de legalización.

En relación con vertimientos deberán documentarse sus características incluyendo sistemas de tratamiento y los registros periódicos que se recopilen sobre las condiciones de la calidad del agua que se descarga en una fuente.

Por otra parte, se espera que la autoridad ambiental cuente con inventario de puntos de monitoreo sobre los cuales se realizan mediciones ocasionales y periódicas, debidamente georreferenciados y catalogados de acuerdo a su ubicación en determinada subzona hidrográfica.

3.3.3. Conjunto de datos del SIRH

A continuación se describen los “Conjuntos de datos base” de tipo alfanumérico que el SIRH contempla en su desarrollo y que recomienda establecer para poder calcular los diferentes indicadores asociados a una ERA:

- **Caracterización de fuentes:** identificación de las fuentes hídricas superficiales con la relación de tramos que han sido identificados, si aplica, y el inventario de fuentes subterráneas presentes en su jurisdicción. Es necesario, asimismo, indicar aquellas asociadas a procesos de reglamentación de corrientes, y que por tanto cuentan con objetivos de calidad y metas de reducción de carga contaminante.
- **Registro de Usuarios del Recurso Hídrico:** inventario de personas naturales o jurídicas que tienen permisos para aprovechar el agua disponible en una fuente o realizar vertimientos. Este módulo debe atender a lo estipulado en el marco de los Decretos 1324 de 2007, 3930 de 2010 y el 303 de 2012, y por tanto debe relacionar de forma detallada la información de contacto de los usuarios, predios, actos administrativos, captaciones y vertimientos.
- **Registro de Puntos de Agua Subterránea:** permite hacer el registro de las características técnicas de pozos de extracción, aljibes o piezómetros, en relación a su localización topográfica, litología, construcción, métodos de extracción, niveles, fuentes potenciales de contaminación, entre otros. Este módulo es el soporte para el funcionamiento del Inventario Nacional de Puntos de Agua Subterránea y la Red Nacional de Monitoreo que lidera el IDEAM.
- **Datos de calidad:** inventario de los puntos de monitoreo establecidos por la autoridad ambiental en cumplimiento de sus funciones de seguimiento a las características de los recursos hídricos de su jurisdicción. Se requiere asociar de forma cronológica a cada punto de monitoreo las mediciones de calidad con sus respectivos valores obtenidos por cada parámetro.

- **Datos de parámetros y variables hidrológicas:** (series históricas) con diferentes niveles de agregación temporal (horario, diaria, mensual, multianual, etc.), niveles, caudales, concentración y transporte de sedimentos, entre otros.
- **Datos de parámetros y variables meteorológicas:** (series históricas) con diferentes niveles de agregación temporal (horario, diaria, mensual, multianual, etc.), precipitación, temperatura, evaporación, entre otros.
- **Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico:** identificación de acciones planteadas por la autoridad ambiental para regular y condicionar los vertimientos a cuerpos de agua, suelo y alcantarillados. Debe relacionarse la destinación del agua a los diferentes usos y las posibilidades de aprovechamiento del agua de una fuente para de esta forma disminuir la presión que se ejerce y dar solución a la problemática ambiental identificada.
- **Planes de Ordenamiento y manejo de cuencas:** identificación de estrategias, proyectos y actividades con sus respectivas metas e indicadores definidos por la autoridad ambiental para mantener el equilibrio entre el aprovechamiento social y económico del agua y la conservación de la estructura físico-biótica de una cuenca.

3.3.4. Modelo de datos y tareas de estandarización

El procesamiento de datos hidrométricos implica: i) *transformar* los datos primarios en información para ser utilizada por los usuarios (registros analógicos, libretas de campo, y datos automáticos enviados desde instrumentos remotos, entre otros) y ii) *someterlos a revisiones* de calidad en las etapas correspondientes. Durante dicha conversión, es clave el uso de:

- Las mismas categorizaciones o listas controladas
- El mismo formato de datos
- Las mismas opciones de unidades de medida

Lo anterior, implementado dentro de un modelo de datos común deberá facilitar el tratamiento homogéneo de la información y su posterior consulta e intercambio a través de herramientas tecnológicas que puedan indexar los datos según las diferentes categorías acordadas.

En tal sentido, el SIRH recomienda el establecimiento de un Modelo de Datos Común que sea implementado por todas las autoridades ambientales y que dé las pautas sobre los contenidos a gestionar, su estructura y las relaciones entre las entidades de análisis. De esta forma, las tareas de reporte de datos establecidas por norma hacia el SIRH se realizarían de forma automática y sin la necesidad de realizar traducciones. Para mayor detalle sobre el modelo de datos y el modelo entidad-relación, consultar los instructivos y documentación del SIRH.

3.3.5. Calidad de la información

Los datos sobre variables hidrológicas, hidrogeológicas, meteorológicas, calidad de agua, sedimentos, etc., se recopilan en el país para consolidar series históricas sobre el comportamiento y cambio en las condiciones de calidad de las fuentes hídricas, comprender los procesos hidrológicos, autorizar concesiones de captación o permisos de vertimiento, realizar investigaciones, generar conceptos sobre cambios en la oferta disponible de una fuente, entre otros. También cumplen un papel clave para realizar tareas de planificación, administración del recurso hídrico, determinar las restricciones y usos posibles de una fuente, generar planes de manejo, etc. En este contexto es necesaria la reflexión sobre la calidad apropiada de los datos para adelantar Evaluaciones Regionales del Agua y las estrategias y acciones para mantener su calidad en el tiempo.

La ERA presupone que se identifiquen las etapas dentro del proceso de administración de datos en las que existen debilidades. En tal sentido es útil que la entidad evalúe el grado de avance y formalización de tareas de gestión de información en sus principales aspectos: planificación, documentación, digitalización, control de calidad y publicación.

En la Figura 12 se presenta una recomendación de pasos para mejorar la calidad de los datos.

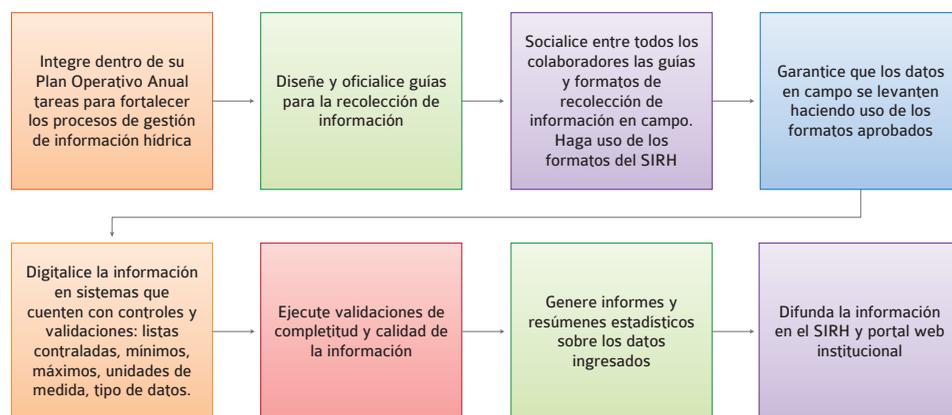


Figura 12. Pasos para mejorar la calidad de los datos

La secuencia de pasos es propuesta para mejorar la calidad de los datos desde el momento de la toma del dato primario, la validación, hasta su salida para ser entregados y difundidos entre el público interesado.

3.4. Fuentes de información nacional y regional

La principal fuente de información de las ERA son las series históricas de las principales variables hidrológicas, meteorológicas y de calidad de agua

monitoreadas en las redes nacional, regional y local de observación y medición. Las bases de datos y el sistema de información ambiental que coordina el IDEAM son el referente nacional. Es necesario complementar y consolidar las bases regionales que soporten la toma de decisiones sobre el agua.

El IDEAM, para el desarrollo de estudios específicos enmarcados dentro de los propósitos del SIRH, emplea información básica e información secundaria de fuentes externas de información entre las que se destacan: DANE, Minagricultura, UPME, Superintendencia de Servicios Públicos, Ingeominas, Agencia Nacional de Hidrocarburos, Corporaciones Autónomas Regionales, entre otras.

A nivel regional estas fuentes son de índole diversa para los componentes de demanda y calidad pero ellas deben ser validadas atendiendo criterios técnicos que garanticen la confiabilidad de la información. Estos criterios tienen que dar cuenta de la relevancia, alcance, autoridad-credibilidad, actualidad, objetividad y exactitud.

3.5. Métodos y técnicas en las ERA

Los métodos y técnicas para la caracterización y evaluación; espacio temporal y cuantificación de la oferta hídrica superficial-subterránea; uso y demanda de agua; calidad del agua, amenaza y vulnerabilidad se desarrollan en la Parte II de estos lineamientos. En cada uno de los temas se presenta el marco metodológico que incluye flujogramas de procedimiento, técnicas para generar resultados de situación actual y tendencias; y análisis integrado del estado a partir del sistema de indicadores hídricos.

3.6. Modelamiento espacial

La información espacial y alfanumérica es una herramienta para la toma de decisiones oportunas, especialmente en lo relacionado con la disponibilidad, uso y aprovechamiento del agua. Las dificultades actuales para la consecución, ordenación, manipulación y distribución de la información, muestran la necesidad de implementar sistemas de información que permitan almacenar y procesar los datos hidrológicos, los censos de usuarios, infraestructura, y demás información necesaria para optimizar la gestión del recurso hídrico.

Contar con la información geográfica y bases de datos sistematizadas en el mediano plazo va a redundar en la optimización de los recursos físicos y de personal, que a la fecha son limitados en las autoridades ambientales, al mismo tiempo que facilitará el trabajo conjunto con sus pares, el intercambio interinstitucional de datos fundamentales, compartir costos y evitar la duplicación de esfuerzos en la captura de datos.

3.6.1. Información geográfica

En el documento Conpes 3585 (DNP, 2009) la información geográfica es definida como “el conjunto de datos que posee un componente geométrico o espacial, que describe la localización de los objetos en el espacio y las relaciones espaciales entre ellos. También se entiende como información geográfica al producto de la georreferenciación de bases de datos temáticas que posean atributos geográficos, tales como las imágenes de sensores remotos satelitales y aerotransportados, la cartografía marítima y aeronáutica, entre otros” (DNP, 2009).

La información geográfica utilizada por las autoridades ambientales para las ERA y la resultante de este proceso debe cumplir con los lineamientos y estándares dados por la Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales (ICDE). “En una Infraestructura de Datos Espaciales, los estándares representan los lineamientos básicos para desarrollar datos geográficos documentados con calidad y dispuestos al intercambio fácil y eficaz” (IGAC, 2010a). Los estándares son necesarios porque:

- Ayudan a crear “datos útiles” al incrementar su consistencia y mejorar su validez.
- Facilitan el uso de los datos y permiten que sean compartidos.
- Promueven un lenguaje común.
- Facilitan la comunicación entre entidades del Gobierno.
- Mejoran las decisiones de gestión al simplificar la tarea de integración de datos de diferentes fuentes.
- Permiten la interoperabilidad entre sistemas.
- Facilitan el desarrollo de bases de datos, al tiempo que maximizan sus aplicaciones y utilización.

De este modo, es posible garantizar la compatibilidad de los productos generados en las ERA; esta compatibilidad se refiere a que los archivos entregados puedan ser leídos y manipulados sobre software especializado de SIG, sin requerir preprocesamiento que actúe en detrimento del producto original; así mismo, que al incorporar la información de las diferentes autoridades ambientales para trabajos conjuntos se disponga de las mismas capas con sus correspondientes atributos y no se presenten diferencias significativas en el empalme como traslapes, vacíos, cambios en el detalle y densidad de elementos dados por la escala de trabajo, por ejemplo en la red hídrica y las curvas de nivel, entre otros.

Sistemas de Coordenadas

Los Sistemas de Coordenadas son el conjunto de parámetros de posición y proyección a partir de los cuales son localizados y cartografiados los elementos que representan objetos del mundo real (SDA, 2009)⁶.

6 Estándar internacional ISO 19111-Geographic information-Spatial referencing by coordinates.

El propósito de adoptar un estándar es precisar los parámetros de los Sistemas de Coordenadas que serán manejados por las ERA en concordancia con los requerimientos del SHRI. De esta forma, los productos cartográficos generados por las autoridades ambientales evitan traslapes y que las diferentes capas no se encuentren ubicadas en el mismo lugar.

Este requerimiento cobra importancia para el trabajo conjunto que deben adelantar las autoridades ambientales, dado el alto porcentaje de cuencas compartidas que existen en el país, por lo que, se deben homogeneizar los sistemas de referencia y orígenes para facilitar el proceso de preparación de la cartografía base y buscar que los resultados obtenidos se puedan incorporar a los demás procesos que realicen en el desarrollo de sus funciones.

Por lo tanto, la información geográfica generada y adquirida por las entidades del Estado utilizará el Sistema de Referencia MAGNA-SIRGAS como sistema adoptado por Colombia (IGAC, 2005); en ese sentido es necesario que la información temática generada en las ERA sea compatible, por lo que van a ser necesarios procesos de migración al Sistema de Referencia MAGNA-SIRGAS cuando la autoridad ambiental esté utilizando otros sistemas. Por ejemplo DATUM BOGOTÁ - Elipsoide Internacional o de Hayford (1924).

En el caso de que la corporación disponga previamente de la cartografía en otro sistema de referencia y se presenten errores en áreas o distancias por el cambio al sistema sugerido en las ERA, la autoridad ambiental debe garantizar que la cartografía que se utilizará cumple mínimo con: cubrimiento total de la jurisdicción, estructuración adecuada y relaciones topológicas. De este modo, no se requerirá la migración de esta, pero se debe establecer un acuerdo con las autoridades ambientales vecinas para la adopción del sistema de referencia que mejor se ajuste a las condiciones de la zona de estudio.

Sin embargo, las autoridades ambientales deberán reportar su información en coordenadas geográficas, en concordancia con lo solicitado en el SIRH.

Cartografía base y temática

La **cartografía base** para las ERA debe ser la producida por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, la cual corresponde a los datos de referencia, que son los que representan la información de temas considerados como básicos para el desarrollo de múltiples aplicaciones y proporcionan la base sobre la que los usuarios complementan su información temática para satisfacer las necesidades específicas de un sector (IGAC, 2010a). En la ICDE se han identificado oficialmente ocho capas como fundamentales: control geodésico, ortoimágenes digitales, elevación, transporte, hidrografía, límites político-administrativos, catastro, nombres geográficos.

De las anteriores, en las ERA se usan principalmente para la construcción de indicadores y la espacialización de los demás componentes: las curvas de nivel, la red hidrológica, los límites municipales, de veredas y la base predial (Figura 13):

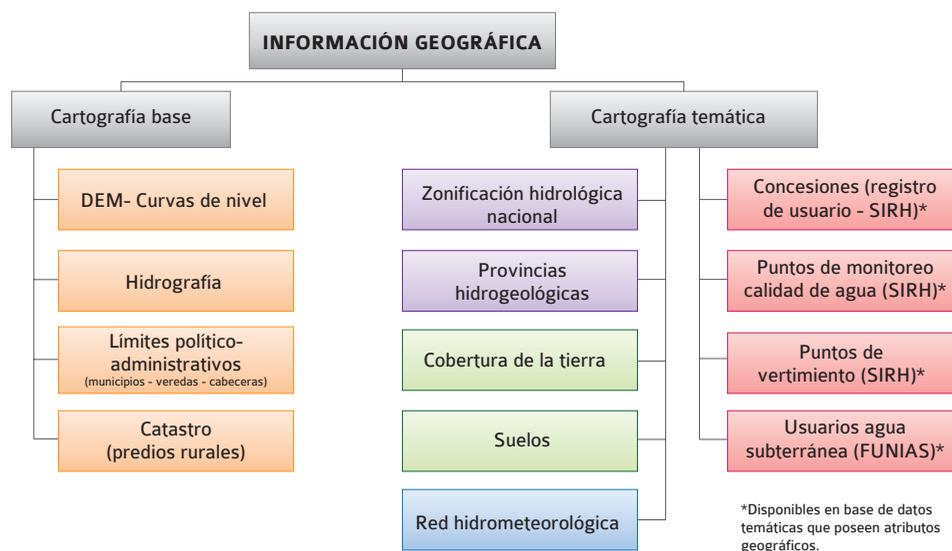


Figura 13. Requerimientos información geográfica ERA

Modelo Digital del Terreno (MDT) o Modelo de Elevación Digital (DEM): es la representación tridimensional de un área, mostrando la conformación del terreno modelado a escala horizontal para ilustrar con toda realidad las características artificiales y físicas naturales. La escala vertical normalmente se exagera para resaltar el aspecto del relieve. El MDT es un archivo de datos con la representación tridimensional de las características del terreno; se utiliza en la ortorrectificación de imágenes, en estudios de perfiles, generación de curvas de nivel, etc (IGAC, 2011). Este se utiliza conjuntamente con las curvas de nivel y es necesario para la modelación de la oferta hídrica superficial. El DEM con una resolución de 30 metros se encuentra bajo custodia del IGAC.

Base predial: la información catastral oficial es producida por el IGAC y en los catastros descentralizados de las ciudades de Bogotá, Medellín, Cali y el departamento de Antioquia. Esta información no es obligatoria, salvo en casos donde los procesos de reglamentación y el registro de usuarios se encuentren asociados al predio.

Adicionalmente, es necesario contar con cartografía temática producida por entidades nacionales y por las autoridades ambientales como son:

Zonificación hidrográfica nacional: en sus tres niveles: áreas, zonas y subzonas hidrográficas. Este último nivel es la base de partida para la definición de las áreas de estudio de las ERA que adelantan las autoridades ambientales. La zonificación está disponible en la página web del IDEAM.

Provincias hidrogeológicas: corresponden a las 16 provincias hidrogeológicas identificadas en la zonificación del IDEAM (IDEAM, 2010a).

Cobertura de la tierra: resulta de la interpretación de fotografías aéreas e imágenes de satélite, o aplicando a las últimas una clasificación no supervisada donde las categorías obtenidas posteriormente se reclasifican para agrupar los usos de acuerdo a los requerimientos. Se sugiere utilizar la metodología Corine Land Cover que cuenta con una nomenclatura estándar para la cobertura de la tierra a escala 1:100.000, que va a facilitar la homologación y comparación de los resultados obtenidos por cada autoridad ambiental en el cálculo de la demanda y la oferta hídrica, en el caso de las jurisdicciones compartidas, en las ERA y para el ENA.

Suelos: conocer las propiedades de los suelos es necesario para el componente de la oferta hídrica superficial; “El Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), desde la Subdirección de Agrología, ha desarrollado estudios de suelos generales y departamentales del país (escala 1:100.000). Los contenidos presentados en las diferentes publicaciones describen las generalidades de los suelos, los aspectos del medio biofísico, métodos y procedimientos, unidades cartográficas, taxonomía, capacidad de uso y zonificación de tierras”⁷.

Red de estaciones hidrometeorológicas: corresponde a las estaciones hidrológicas y meteorológicas; la información que se obtiene a partir del monitoreo de variables en estas estaciones se utiliza para la generación de productos en la ERA, en particular para la caracterización de los sistemas hídricos, la estimación de la oferta hídrica superficial, generación de indicadores hídricos, evaluación del riesgo, entre otros. Para ver los diferentes tipos de estaciones hidrometeorológicas consulte la página web del IDEAM.

Bases de datos de usuarios susceptibles de espacializar: estas bases de datos guardan relación directa con el SIRH, de este modo, la información dispuesta en el SIRH será insumo para la construcción de las ERA, tales como: registro de usuarios del recurso hídrico, que incluye concesiones y vertimientos; usuarios de agua subterránea (FUNIAS); y puntos de monitoreo de calidad de agua.

Escala: es la relación existente entre la dimensión real de un objeto y la dimensión de su representación en un mapa (SDA, 2009). Las escalas serán definidas de acuerdo al área de estudio y características de los objetos representados en el mapa, en cada uno de los temas manejados por las ERA, en concordancia con la legislación vigente.

Para las ERA se maneja en dos niveles: la escala para el procesamiento de información y la escala de salida de los productos cartográficos. La escala de procesamiento será definida para cada ERA de acuerdo a tamaño del área de

estudio, disponibilidad de la cartografía base oficial, importancia y requerimientos de la autoridad ambiental frente a la zona de estudio.

Existe información puntual que se espacializa con base en las coordenadas X, Y y Z de cada elemento, las cuales dependen principalmente de la precisión con que se hayan obtenido (método y equipo), por lo que no se les define un rango de escala. Esta corresponde a las concesiones, puntos de vertimiento, estaciones de monitoreo y red hidrometeorológica.

La escala de salida, para el caso de los mapas mensuales producidos para el cálculo de la oferta superficiales, se sugiere que se maneje de la misma forma en que se ha representado en los ENA, donde en una misma hoja carta se disponen en miniatura los 12 mapas mensuales utilizando la misma leyenda (rangos y colores), para que sea posible rápidamente detectar las variaciones del régimen hídrico que se presentan durante los meses del año. Para los demás mapas dependerá de la autoridad ambiental el formato para la difusión de los resultados.

3.6.2. Gestión documental

La información temática generada en el desarrollo de las ERA debe complementarse con una documentación básica para que pueda ser usada en diversos procesos de planeación y ordenamiento territorial de la región. La documentación la conforman diccionarios de datos, plantillas de metadatos y documentos en general relacionados con el proyecto cartográfico y la generación de datos espaciales derivados.

Diccionarios de datos

Son el compendio de las características esenciales de cada una de las capas, como (SDA, 2009):

- **Objeto/capa (cobertura):** número identificador de la capa.
- **Objeto o entidad:** tema representado por la capa.
- **Nombre del archivo digital:** nombre del archivo digital que contiene la capa.
- **Geometría:** tipo de geometría propia de la capa.
- **Tamaño:** tamaño del conjunto de archivos digitales que conforman la capa.
- **Número de elementos:** número de elementos que forman parte de la capa.
- **Leyenda:** nombre del (los) archivo(s) que contiene(n) la clasificación temática y simbolización de la capa.
- **Fuente:** descripción del tipo, nombre, autor, escala, fecha de elaboración, nivel de actualización de la información cartográfica, fuente utilizada para la elaboración del proyecto.
- **Atributos:** características específicas que describen la capa.
- **PK:** especifica si el campo es el identificador o llave primaria de la tabla.
- **Nombre del campo:** nombre del atributo.
- **Descripción:** descripción del contenido del campo.

- **Longitud del campo:** longitud del campo, de acuerdo al tipo de dato.
- **Tipo de dato:** tipo de dato numérico, cadena de caracteres, etc.
- **Dominio:** conjunto de valores posibles aceptados por el campo.
- **Muestra gráfica:** vista gráfica de la capa.

Metadatos

El metadato es un conjunto de atributos organizados en un modelo de datos, que “proporciona información acerca de identificación, calidad, representación espacial, sistema de referencia espacial, contenido de los datos, catálogo de símbolos y distribución, para un conjunto cualquiera de datos geográficos” (IGAC, 2010b).

Los metadatos geográficos son útiles para proveer información sobre los productos que dispone la organización a sus usuarios, para optimizar el manejo y administración de datos geográficos y para conocer la información descriptiva de los datos de otras instituciones (IGAC, 2010b).

El Metadato de la Información Geográfica se solicita con el fin de identificar y catalogar los datos o conjuntos de datos geográficos que produce la autoridad ambiental en el marco de la ERA, y de este modo, promover el uso, la divulgación e intercambio de la misma al interior de la corporación, entre las diferentes autoridades ambientales y con el Sistema Nacional Ambiental y evitar la duplicación de esfuerzos en la producción de información.

En Colombia existe la norma NTC 4611 –Metadatos geográficos, como perfil de la ISO 19115– Metadata. El aplicativo disponible en la página <http://geonetwork-opensource.org/> se encuentra bajo esta norma internacional.

3.6.3. Marco metodológico

Actualmente, el 60% de las corporaciones autónomas disponen de cartografía básica a escala 1:25.000 y mayores; respecto a la cartografía temática, la disponibilidad es menor y se presenta en mayor medida para el componente de amenazas y vulnerabilidad y posteriormente para el componente de la oferta superficial; dejando a los componentes de demanda y calidad con los menores porcentajes de información especializada o susceptible de georreferenciar (IDEAM, 2011b, 2011c, 2011d).

Las autoridades ambientales cuentan con herramientas para la sistematización de la información, pero aún se requiere fortalecer la capacidad técnica y tecnológica para implementar actividades de consolidación, actualización y depuración de la información geográfica. En este sentido, se hace necesario un proceso de mejoramiento de los sistemas de información geográfica regionales que incorpore actividades orientadas a la gestión y uso de la información geográfica. En la

Figura 14 se presenta el procedimiento metodológico para el modelamiento espacial de los referentes y variables de las ERA.

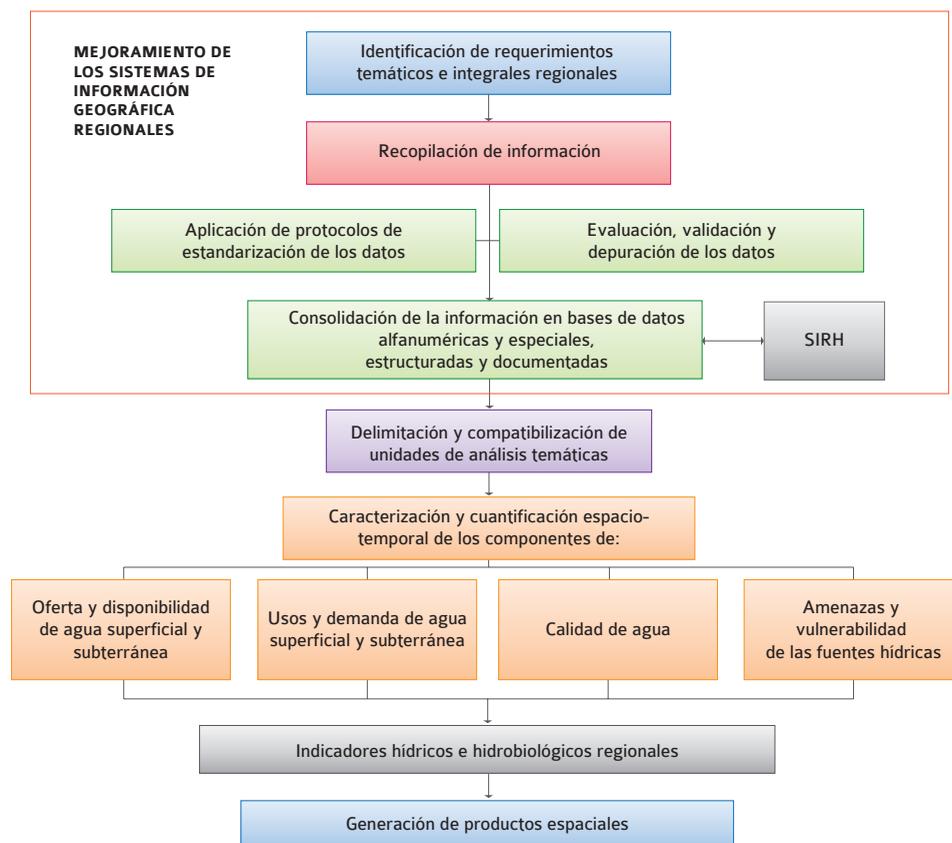


Figura 14. Procedimiento metodológico para el modelamiento espacial de las ERA

Este proceso inicia con la identificación de requerimientos de información sobre el recurso hídrico de las autoridades ambientales y el establecimiento de las prioridades para la generación y actualización de la información geográfica.

Posteriormente, se debe recopilar la información y aplicar los protocolos de estandarización de datos en cuanto a: formatos, sistemas de coordenadas, escala y unidades espaciales; siempre en el marco de lo definido por la ICDE y el SIRH, para que permitan la integración y comparación de las ERA y la compatibilidad con la información geográfica de las demás autoridades ambientales y con el nivel nacional.

Así mismo, se deben apoyar los demás componentes de las ERA en el proceso de evaluar, validar y depurar los datos y sus fuentes de información, procurando el uso de información oficial para la generación de la información secundaria necesaria para el desarrollo de las ERA; teniendo en cuenta, que se puede complementar la información oficial con la información existente en la entidad y datos procesados por otras entidades.

Las acciones anteriores van a permitir que las autoridades ambientales consoliden la información del recurso hídrico en bases de datos espaciales y alfanuméricas, multipropósito, que podrán usar en las ERA para la toma de decisiones sobre el uso, aprovechamiento y manejo del recurso hídrico de su jurisdicción. Adicionalmente, la documentación podrá ser usada por las demás entidades públicas, buscando un uso eficiente y coordinado de los recursos físicos, humanos y financieros.

Después de contar con la información requerida y dispuesta de la manera adecuada para las ERA, es importante discutir entre los diferentes componentes cuáles serán las unidades de análisis, teniendo en cuenta que deben ser factibles de agregación para que sea posible la homogeneización de unidades para el cálculo de indicadores.

Ya contando con las unidades de análisis y las bases de datos estructuradas, es posible procesar la información para cada uno de los componentes de las ERA y construir los indicadores de referencia regional, los cuales finalmente se espacializarán por unidad de análisis.

En la Figura 15 se detallan los cruces principales de las variables hidrometeorológicas y de las capas de la cartografía base y temática, para la obtención de los respectivos productos espaciales. Incluye qué tipo de información se procesa y cuál resulta, es decir, si es información vectorial (punto, línea, polígono) o si es raster. Para la obtención de la zonificación hídrica regional se requiere el procesamiento del DEM junto a la red hídrica; para el componente de oferta hídrica superficial se parte de información puntual asociada a la red hidrometeorológica que mediante procesos de interpolación se convierte en raster; para demanda y calidad, los principales insumos son bases de datos que se espacializan, se maneja el formato vector; para la espacialización de los indicadores se debe vectorizar los resultados de la oferta para que sea posible su integración a los demás componentes.

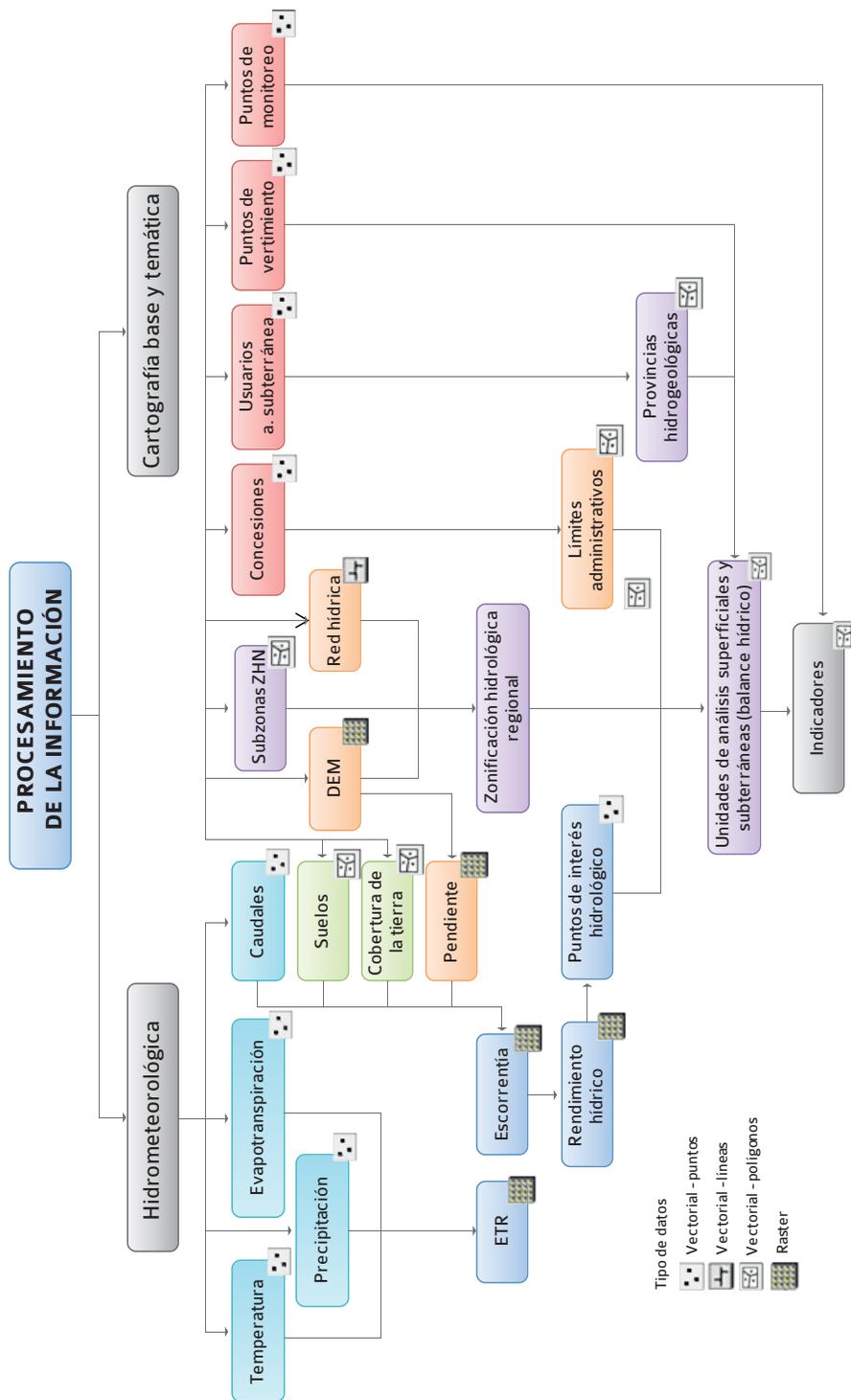


Figura 15. Procesamiento de la información geográfica



El Estudio Nacional del Agua 2010 permitió conocer el panorama nacional sobre el estado y la dinámica del agua en Colombia en las 309 subzonas hidrográficas y las 16 provincias hidrogeológicas en que se ha dividido el país para efectos de la evaluación hidrológica nacional. A nivel regional se requiere evaluar con mayor precisión, con fines de planificar, gestionar y administrar el agua en unidades de análisis tanto hidrográficas como hidrogeológicas de mayor resolución.

Esta Parte II del documento se ocupará de los elementos conceptuales y metodológicos para las ERA, teniendo como referente básico los del Estudio Nacional del Agua 2010, para dar respuesta a las necesidades de información y conocimiento en el ámbito regional sobre la oferta y disponibilidad de agua superficial y subterránea; usos, demanda y calidad de agua, amenazas y vulnerabilidad de las fuentes hídricas. Así mismo, sienta las bases para el desarrollo de un análisis integral a partir de la construcción de indicadores del estado y dinámica del agua.

PARTE II

Elementos conceptuales y metodológicos temáticos



Capítulo 1.
Evaluación del estado y dinámica del agua superficial



Capítulo 2.
Evaluación de la dinámica y estado del agua subterránea



Capítulo 3.
Evaluación de la demanda del agua



Capítulo 4.
Evaluación de la calidad de agua



Capítulo 5.
Componente de riesgo en la evaluación regional del agua





Capítulo 1

Evaluación del estado y dinámica del agua superficial

La normatividad vigente determina en gran medida lo que se debe conocer para conservar las características del régimen hídrico y administrar la oferta de agua en las diferentes regiones en términos de cantidad, dinámica y distribución, su relación con otros elementos del medio natural y los efectos por actividades antrópicas.

En este contexto para la evaluación a nivel regional se requiere conocer el comportamiento del agua superficial y estimar tanto la oferta como la disponibilidad de agua en cuencas de jerarquía menor a las subzonas hidrográficas. La implementación de modelos dinámicos permitirá mejorar la interpretación de procesos que se dan en el ciclo hidrológico y apoyar las estimaciones de los componentes del balance hídrico en unidades hídricas adecuadas para la administración del agua por parte de las Corporaciones Autónomas Regionales, Autoridades Ambientales Urbanas y Parques Nacionales Naturales.

En este capítulo se presentan los elementos conceptuales y metodológicos para determinar las características del sistema con base en la caracterización del régimen hidrológico y dinámica de los sedimentos, cuantificación y distribución del agua a nivel regional, para condiciones hidroclimáticas anuales y mensuales de año medio, año seco y año húmedo, dentro de las limitaciones que aún existen en el país en materia de información.

1.1. Marco conceptual

Los procesos que se dan en la dinámica del Ciclo Hidrológico y su Balance Hídrico son el modelo básico para entender las características del régimen hidrológico, de la oferta hídrica superficial y su disponibilidad en unidades hidrográficas de análisis a nivel regional. La variación espacial y temporal de las variables básicas que representan las fases del ciclo da cuenta de la interacción del agua con los otros elementos del medio natural y de los efectos de acciones antrópicas que intervienen directamente en el agua y en otros elementos naturales, como el suelo y la cobertura vegetal y los diferentes ecosistemas.

1.1.1. Procesos del ciclo del agua

El ciclo de agua representa el proceso permanente de movimiento o transferencia de masas de agua entre sus diferentes estados (líquido, gaseoso y sólido). Este sucede bajo la influencia de la radiación solar, de la acción de la gravedad y la dinámica de la atmósfera, litósfera y biósfera. Las diferentes fases del ciclo son el marco de referencia para el estudio del estado y del comportamiento del agua.

El ciclo hidrológico está gobernado por procesos naturales continuos pero irregulares en el espacio y en el tiempo. Una gota de lluvia puede recorrer todo el ciclo o una parte de él. Los principales procesos de este ciclo se observan y representan en la Figura 3 y en la Figura 4. La parte del agua precipitada que escurre a lo largo de las laderas puede ser interceptada por las depresiones naturales del terreno, donde se evapora o infiltra, o, se mueve a través de los drenajes naturales de la cuenca y forma el flujo superficial. Los flujos superficial, subsuperficial y subterráneo conforman la escorrentía que integra los caudales de los cauces de las corrientes, alimenta los diferentes almacenamientos y drena finalmente al mar. Una fase fundamental del ciclo es la evaporación, que no solo transfiere vapor de agua desde la superficie de la Tierra a la atmósfera sino que colabora a mantener la superficie de la Tierra más fría y la atmósfera más caliente. La acción del hombre altera estos procesos naturales, su dinámica y la distribución espacial y temporal de la cantidad de agua superficial, en consecuencia el balance hídrico natural en las unidades hidrográficas que integran una región.

1.1.2. Régimen hidrológico

El régimen hidrológico es el modelo predominante del flujo de aguas en un periodo de tiempo (GreenFacts, 2011). En el Glosario Hidrológico Internacional (Unesco, s.f.) se define como “variaciones del estado y características de una masa de agua que se repiten regularmente en el tiempo y en el espacio y que son cíclicas, por ejemplo, estacionales”.

El comportamiento de los caudales sintetiza en gran medida el régimen hidrológico de una corriente hídrica como resultado de la interacción del medio natural y la dinámica de flujos de los procesos del ciclo hidrológico y sus interacciones.

En el documento “Régimen de caudales: definición del estatus hidrológico y valoración de la alteración” presentado por Martínez y Fernández para el III Congreso de Ingeniería Territorio y Medio Ambiente (Martínez, Fernández, 2006), se define régimen natural y régimen alterado como:

“Un régimen de caudales es natural cuando sus características –magnitud, frecuencia, estacionalidad, duración y tasas de cambio– no están sensiblemente alteradas por la acción del hombre.

Un régimen de caudales es alterado cuando el hombre ha modificado el régimen natural mediante regulación, sustracción y/o incorporación de caudales. También se incluyen en esta categoría las propuestas de regímenes ambientales o ecológicos”.

El análisis del régimen de caudales en puntos de monitoreo de referencia, representativos de las cuencas hidrográficas (unidades de análisis) permite un análisis del régimen hidrológico natural. Igualmente, permite identificar si un régimen de caudales es alterado cuando el hombre ha modificado el régimen de caudales natural mediante regulación, sustracción y/o incorporación de caudales. (Ibíd).

La caracterización del régimen natural como estado de referencia y la evaluación de la alteración del régimen permiten identificar los cambios en el comportamiento del régimen de caudales como resultado de comparar parámetros del régimen de caudales en condiciones naturales con los de régimen alterado en un tramo de una corriente o en una unidad hídrica de análisis.

El componente básico para analizar el régimen de caudales en los aspectos de variabilidad, magnitud, duración y estacionalidad está dado por valores habituales (normales) anuales, mensuales, diarios, y valores extremos máximos (avenidas) y mínimos (sequías). Los valores característicos se obtienen del análisis de series de caudales medios mensuales multianuales, series de caudales mínimos multianuales y series de caudales máximos multianuales.

1.1.3. Dinámica de los sedimentos

El IDEAM desarrolla investigación sobre los procesos de producción y transporte de sedimentos, en particular sobre el marco conceptual y metodologías para determinar la erosión y transporte de sedimentos en cuencas hidrográficas. En este punto se presenta una síntesis de los avances teniendo como base el documento sin publicar elaborado por el IDEAM (Contreras, 2013).

Una Gestión Integral de Recurso Hídrico (MAVDT, 2010a) implica conocer sobre estado de reposo, iniciación del movimiento, transporte como carga de fondo y transporte en suspensión. El proceso de iniciación, transporte y depósito de sedimentos no es simplemente determinístico sino estocástico dado que los granos a moverse no son necesariamente los mismos ni tampoco guardan el orden original de movimiento y transporte, y aun cuando hay aproximaciones a través de ecuaciones definidas para modelar este tipo de movimientos, todavía se predice con alto grado de incertidumbre los procesos turbulentos que dan lugar a la dinámica sedimentaria.

Clasificación del transporte de sedimentos

De acuerdo con el protocolo de Monitoreo y Seguimiento del Agua (IDEAM, 2007), los sedimentos según la manera como se transportan se pueden clasificar en sedimentos

de fondo, de arrastre de fondo, en saltación, y en suspensión. Pero también Martín Vide establece una clasificación para el transporte de sedimentos por un río según el modo de transporte y según el origen del material. Según el modo de transporte, el sedimento puede ser transportado en suspensión, sostenido por la turbulencia del flujo, o bien por el fondo, rodando, deslizando o saltando. Una partícula inicialmente en reposo puede ser transportada a saltos por el fondo cuando se supera el umbral del movimiento, pero según la dinámica del caudal del río puede ser transportada luego en suspensión. Cuanto más intensa es la acción de la corriente, mayor es el tamaño del material de fondo que es puesto en suspensión y transportado de ese modo. Se observa pues que el transporte de sedimento cuyo origen es el cauce se reparte entre los dos modos de transporte: en suspensión y de fondo.

Según el origen (entendido como el origen durante un episodio de lluvias y crecida fluvial) del material transportado, este puede ser de la cuenca hidrográfica y del lecho o cauce, aunque es evidente que a largo plazo todo el material del cauce tiene también su origen en la cuenca. *El origen en la cuenca significa que simultáneamente al transporte de fondo y suspensión con origen en el cauce, la corriente transporta material con origen en la cuenca, muy fino llamado material de lavado de la cuenca.* Es así como el transporte en suspensión que va en un cauce tiene dos orígenes distintos. Un criterio práctico (Shen, H.W., 1972) para separar un origen del otro es el tamaño de las partículas $D = 0.0625 \text{ mm.}$, el material inferior a este diámetro (arcillas y limos) procede mayoritariamente del lavado de la cuenca en tanto que el superior (arenas, etc.) procede del lecho. En la Figura 16 se resume dicha clasificación y el transporte total es la suma de los dos modos (o la suma de los dos orígenes).

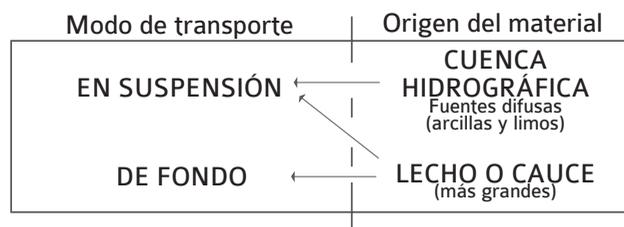


Figura 16. Clasificación del transporte de sedimentos

Fuente: Martín Vide Juan P. Ingeniería de Ríos, pág 61.

Procesos de erosión, transporte y depósito de sedimentos

Se distinguen tres fases en el proceso de erosión de cuencas (Martínez M., 2001), inicialmente se produce la remoción de las partículas por la acción de la lluvia, del viento y por la acción humana; estas partículas sueltas presentes en el suelo son transportadas a lo largo de la ladera; y finalmente, estos materiales se depositan en los cauces de los ríos pudiendo alcanzar las zonas más llanas, los embalses o el océano.

La evaluación, de manera confiable, de los volúmenes de sedimentos que los ríos transportan requiere de análisis que contemplen la relación que existe entre la cuenca como productora de sedimentos y el río como conductor de los mismos.

La iniciación del transporte de sedimentos está directamente relacionada con la velocidad del flujo; cuando la corriente tiene velocidades bajas las partículas de sedimento permanecen prácticamente inalteradas pero a medida que se incrementa la velocidad los granos comienzan a moverse y cuando alcanzan un valor crítico se presenta desplazamiento en la dirección marcada por la corriente en formas típicas (dependiendo tanto del flujo como de las mismas partículas) como son por reptación o tracción, rodamiento, saltación y suspensión. De manera resumida, las etapas propias del movimiento de sedimentos, a medida que se acelera el flujo se pueden identificar.

El transporte en suspensión puede representar el 90% o más de todo el transporte sólido de un río, especialmente de un río grande, y dentro de él el material de lavado puede ser una parte importante. Este material de lavado está ligado a las características hidrológicas de la cuenca: la litología, los suelos, las pendientes, la vegetación, la precipitación, la escorrentía, etc. De hecho la pérdida de suelo de una cuenca podría cuantificarse mediante el material de lavado transportado por el río. El río sirve tan solo de corredor o vector de este transporte, al menos mientras no desborda su cauce principal. Las llanuras de inundación, sin embargo, contienen cantidades importantes de material menor de 0.062 mm, en cambio esta clase de material se encuentra en cantidades despreciables en los lechos de los cauces principales. El material transportado en suspensión tiene gran repercusión en la salida o desembocadura de un sistema fluvial: en la formación de los deltas o la colmatación de los embalses, en tanto que el transporte de fondo (el 10% restante, quizás) tiene, sin embargo la mayor repercusión morfológica sobre el río mismo, porque su desequilibrio causa modificaciones morfológicas, erosiones y sedimentaciones. El transporte de fondo o el transporte del material del cauce (transporte de fondo más el de suspensión con origen en el lecho) está ligado a las características hidráulicas del cauce: ancho, pendiente, granulometría, caudal, etc.

De acuerdo con Collins A. L. y Walling D.E. (2004), haciendo valoración visual en campo de la evidencia sobre la movilización y la entrega del sedimento en suspensión, las fuentes potenciales de la carga de sedimento en una cuenca pueden ser vistas a través de un esquema (Figura 17) que requiere información sobre los tipos o ubicación espacial de las fuentes de sedimento individual. Diferentes tipos de fuentes de sedimentos suspendidos se pueden clasificar en términos de laderas o canales del río, o porciones superficiales y subsuperficiales de una cuenca, en tanto que la procedencia espacial será fácilmente categorizada con base en subcuencas individuales tributarias o unidades geológicas.



Figura 17. Esquema de fuentes puntuales de sedimentos suspendidos

Fuente: A.L Collins and D.E. Walling. Documenting catchment suspended sediment sources: problems, approaches and prospects. Progress in Physical Geography 28,2 (2004) page 164. SAGE Publications.

En cuencas grandes se procura mirar ambas condiciones, tanto los tipos de fuentes como las fuentes espaciales; sin embargo, muchos de los estudios se centran más en las espaciales (por ejemplo subcuencas o áreas geológicas). En pequeñas cuencas (<50 km²), en donde se espera que sea más baja la complejidad espacial de las fuentes de sedimento, con frecuencia es más significativo investigar la procedencia del sedimento suspendido en términos de tipos individuales de sedimento.

1.1.4. Balance hídrico en unidades hidrográficas de análisis regional

El conocimiento, interpretación y análisis de los procesos hidrológicos y componentes del balance hídrico permiten caracterizar las condiciones del recurso agua en los diferentes sistemas hidrológicos del país. Mediante la comprensión de los flujos, almacenamientos y balances que hacen parte del ciclo hidrológico, se consigue determinar el régimen hidrológico, estimar y cuantificar la oferta hídrica en unidades de análisis representativas en la ERA.

El balance hídrico es la base para cuantificar la oferta hídrica en una unidad hídrica de análisis, a partir del cálculo de entradas y salidas de flujo. Este balance natural, sin mayores alteraciones o intervención antrópica está representado en la Ecuación 1 para una zona, subzona o unidad hidrográfica de drenaje específica.

$$P - \text{Esc (total)} - \text{ETR} \pm \Delta S \pm \Delta er = 0$$

Ecuación 1

Donde:

P: precipitación (mm)

Esc: escorrentía total (mm) (flujo superficial + flujo subterráneo)

ETR: evapotranspiración real (mm) (evaporación + transpiración)

ΔS: almacenamiento

Δer: término residual de discrepancia

Sin embargo, cuando las unidades hidrográficas de análisis corresponden con áreas hidrográficas reguladas o muy intervenidas para uso y aprovechamiento por parte de los diferentes sectores usuarios del recurso, la ecuación general, para una unidad de tiempo determinada (anual o mensual) de balance hídrico estaría representada por la siguiente ecuación:

$$P - ETR - Ex + Rt \pm Tr \pm \Delta S \pm \Delta er = Esc \text{ (medida)}$$

Ecuación 2

Donde:

P: precipitación (mm)

ETR: evapotranspiración real (mm) (evaporación + transpiración)

Ex: sumatoria del volumen extraído expresado en mm (demanda)¹

Tr: sumatoria de volumen de transvase (mm) hacia (+) o desde la cuenca (-)

ΔS : cambio de almacenamiento (mm)

Rt: sumatoria del volumen de agua que retorna a la cuenca asociada a diferentes actividades, en el período considerado (mm)

Esc (medida): escorrentía promedio a partir del caudal medido en la estación hidrométrica².

En este contexto es necesario interpretar el comportamiento de las diferentes variables que integran los balances hídricos para caracterizar la oferta hídrica y su disponibilidad en las diferentes regiones como resultado de la interrelación de los parámetros hidrológicos, meteorológicos (precipitación, evapotranspiración potencial, evapotranspiración real y escorrentía) y los que corresponden a volúmenes de alteración por actividades antrópicas.

Las variables más representativas del balance hídrico son la *precipitación* como variable de entrada y la *escorrentía* como variable síntesis de salida, razón por la cual son fundamentales en el programa de monitoreo continuo en las redes hidrológicas y meteorológicas. La *evapotranspiración* corresponde al componente natural de pérdida por evaporación directa y por transpiración.

Precipitación

La precipitación es el volumen de agua que cae por acción de la gravedad sobre la superficie terrestre en forma de lluvia, llovizna o granizo procedentes de la condensación del vapor de agua (IDEAM, 2010a). Depende de tres factores: la presión atmosférica, la temperatura y, especialmente, la humedad atmosférica.

La distribución de la precipitación en Colombia está determinada por las variaciones espacio-temporales de la Zona de Confluencia Intertropical, por la influencia de los

1 La demanda de agua corresponde con la sumatoria en un año específico.

2 Se obtiene del caudal promedio medido en la estación hidrométrica de referencia y para el período considerado para el análisis.

sistemas de circulación general de la atmósfera de la zona tropical y subtropical y por la interacción de estos factores con las características fisiográficas del país. Estas condiciones son las que generan la diversidad climática de Colombia, que se manifiesta en una distribución heterogénea de las lluvias.

Escorrentía

La escorrentía hídrica superficial es la lámina de agua que circula sobre la superficie en una cuenca de drenaje, es decir, la altura en milímetros del agua de lluvia escurrida y extendida. Este flujo superficial corresponde al componente de la ecuación del balance hídrico, definido como parte de la precipitación que por no infiltrarse o evaporarse fluye por la superficie del suelo y se concentra en los cauces y cuerpos del agua. La escorrentía se expresa en milímetros de lámina mensual o anual. Se expresa mediante un proceso de conversión en rendimiento hídrico o caudales. El rendimiento hídrico es una manera de expresar la escorrentía por unidad de área, teniendo en cuenta el área aferente al sitio de observación. El rendimiento hídrico o caudal específico se define como la cantidad de agua superficial por unidad de superficie de una cuenca, en un intervalo de tiempo dado ($l/s\text{-km}^2$).

En concordancia con la variabilidad de la precipitación, la escorrentía media anual en Colombia y su distribución a través del año es muy heterogénea, lo cual determina la variabilidad y cuantificación de la oferta hídrica superficial y disponible en las diferentes regiones del país.

Evapotranspiración real (ETR)

Se define la evapotranspiración como la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación. Se expresa en mm por unidad de tiempo.

La evapotranspiración real, actual o efectiva ocurre en la situación real en que se encuentra el sistema y difiere de los límites máximos o potenciales establecidos. En la ETR además de las condiciones atmosféricas interviene la magnitud de las reservas de humedad del suelo y los requerimientos de la cobertura vegetal. Para referirse a la cantidad de agua que efectivamente es utilizada por la evapotranspiración se debe utilizar el concepto de evapotranspiración actual o efectiva, o el de evapotranspiración real.

La ETR es uno de los componentes básicos de la ecuación del balance hídrico. Esta se obtiene aplicando fórmulas de diferentes autores donde se interrelacionan variables como la precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial (ETP).

Almacenamiento

[78]

Las características del régimen hídrico y la oferta de agua se complementan con los almacenamientos superficiales, representados por los cuerpos de agua lénticos,

ecosistemas de humedales, lagos, lagunas, ciénagas y pantanos y la oferta regulada con reservorios y embalses. Estos cuerpos de agua y sus áreas de influencia son de gran importancia hidrológica y ecológica, con una influencia directa en las condiciones del régimen hídrico natural e influido. Están relacionadas con la capacidad de retener y regular caudales en la cuenca. Un componente importante del balance hídrico es el cambio en el volumen almacenado, durante el periodo considerado.

Los ecosistemas de humedales son zonas de amortiguación de niveles de agua altas, lugares de refugio ecológico transitorio de especies migratorias y de alta productividad biológica por disposición de nutrientes durante la época de niveles altos (IDEAM, 2010a). Las ciénagas son consideradas el mecanismo básico constituyente del plano inundable, razón por la cual sus formas y tamaños, considerados en un año hidrológico, están en función del nivel del agua en el sistema. Dichos planos inundables son los receptores globales de las masas de agua provenientes de las lluvias a lo largo de las cuencas y las ciénagas así constituidas mantienen conexiones con los ríos principales por medio de canales de características meandriformes. Un importante componente de los cuerpos de agua corresponde a los ambientes pantanosos caracterizados por su permanente saturación de humedad y casi nula fluidez en la superficie del suelo.

Los ecosistemas de páramo son de reconocida importancia por su función reguladora de los flujos superficiales y subterráneos. Se caracterizan por mantener altas retenciones de agua, rendimientos hídricos y capacidades de almacenamiento asociadas con las condiciones de infiltración y el sostenimiento del flujo base de las corrientes que nacen y descienden de estos ecosistemas. Igualmente, se le reconoce excelente calidad de agua y la presencia de complejos de humedales, formación de niebla y capacidad de retención de las plantas, entre otros. La extrema capacidad de regulación hídrica de los páramos es descrita por muchos autores como Luteyn, 1992; Hofstede, 1995c; Sarmiento, 2000; Mena y Medina, 2001; Podwojewskiet ál., 2002; Poulenard et ál., 2003, citados en García (2010). Estos ecosistemas poseen características que les confieren una importante función hídrica en zonas de clima frío, lo cual significa una evapotranspiración y evaporación menores. Se encuentran igualmente, zonas de condensación cerca al límite altitudinal del bosque donde el fenómeno de la niebla es frecuente. Es decir, la niebla y el rocío desempeñan en esta zona un papel definitivo como generadores de importantes volúmenes de agua horizontal, los cuales contribuyen hasta en un 80% de la escorrentía de los ríos de alta montaña (IDEAM, 2002a). Sin embargo, el conocimiento sobre el ciclo del agua en los diferentes tipos de páramo requiere un esfuerzo de investigación importante que aporte en diferenciar el comportamiento hídrico y cuantificar la capacidad de regulación de estos ecosistemas de páramo en el país (García, 2010).

1.1.5. Conceptos clave en la evaluación de la oferta hídrica superficial

Para la caracterización de la oferta hídrica superficial y su evaluación en las regiones se consideran los siguientes conceptos:

Oferta Hídrica Total Superficial (OHTS): es el volumen de agua que escurre por la superficie e integra los sistemas de drenaje superficial. Es el agua que fluye por la superficie de suelo, que no se infiltra o se evapora y se concentra en los cauces de los ríos y/o en los cuerpos de agua lénticos.

Oferta Hídrica Disponible (OHTD) (IDEAM, 2010a): es el volumen de agua promedio que resulta de sustraer a la OHTS el volumen de agua que garantizaría el uso para el funcionamiento de los ecosistemas y de los sistemas fluviales, y -en alguna medida- un caudal mínimo para usuarios que dependen de las fuentes hídricas asociadas a estos ecosistemas (caudal ambiental).

Oferta Hídrica Regional Disponible (OHRD): es la OHTD más los volúmenes de agua de caudales de retorno asociados a diferentes usos, incluye la suma o resta de caudales de trasvase que ingresen a la cuenca o salgan de ella. Esta es la oferta que se utiliza para el cálculo del Índice de Uso de Agua (IUA).

Oferta Hídrica Regional Aprovechable (OHRA): es el volumen de agua que resulta de sustraer del volumen de agua promedio medido en la estación hidrométrica de referencia, representativa de la unidad de análisis considerada, el volumen de agua correspondiente al caudal ambiental.

Año hidrológico medio: está definido por los caudales medios mensuales multianuales de la serie histórica de caudales medios (Ibíd).

Año hidrológico húmedo: está definido por los caudales máximos de los medios mensuales multianuales de la serie de caudales medios mensuales (Ibíd).

Año hidrológico seco: son los caudales mínimos mensuales de las series de caudales medios; los cuales se identifican con el año típico seco. (Ibíd).

Caudal de retorno: es el porcentaje del caudal extraído por los diferentes sectores usuarios que es devuelto a los cauces o cuerpo de agua en el período de tiempo considerado.

Caudal ambiental: se define como “el volumen de agua necesario en términos de calidad, cantidad, duración y estacionalidad para el sostenimiento de los ecosistemas acuáticos y para el desarrollo de las actividades socioeconómicas de los usuarios aguas abajo de la fuente de la cual dependen tales ecosistemas” (Decreto 3930, 2010).

1.2. Marco metodológico

En el flujograma de la Figura 18 se presenta el procedimiento general para esta evaluación.



Figura 18. Procedimiento general para evaluar el componente de agua superficial en las ERA

El procedimiento hace referencia a los dos componentes principales de la evaluación de agua superficial en términos de estado y dinámica de cantidad: caracterización del régimen hidrológico y caracterización de oferta hídrica, teniendo como soporte las características morfométricas de las cuencas.

En este ítem del documento se muestran los procedimientos para los componentes de la evaluación mencionados. Contiene instrumentos técnicos, protocolos de monitoreo, información y fuentes de información, unidades de análisis y proceso de modelamiento espacial para la generación de información agregada en las unidades respectivas.

1.2.1. Características morfométricas y fisiográficas de unidades hídricas superficiales de análisis

La caracterización hidrológica de las cuencas debe iniciar con un reconocimiento de sus aspectos fisiográficos y morfométricos que den cuenta de su geometría, geología, geomorfología hidrografía y fisiografía. Este análisis se hace a partir de un estudio cuantitativo de las características físicas de una cuenca hidrográfica, analizando la red de drenaje, la pendiente y la forma de la cuenca.

Estas características juegan un papel importante para el entendimiento de los procesos hidrológicos y sus variaciones en tiempo y espacio. Se consideran de particular utilidad los factores que sirven para el cálculo de datos hidrológicos

en sitios donde no se dispone de observaciones hidrométricas directas y para aplicaciones donde es necesario determinar las características propias del régimen hidrológico de las corrientes. Igualmente para analizar la capacidad de arrastre de sedimentos y el incremento de velocidad del caudal.

Los *factores fisiográficos* genéticos del régimen hidrológico más relevantes son los siguientes:

- La red hidrográfica, indicada en los mapas topográficos y en lo posible representada en esquemas claros que permitan a los tomadores de decisiones reconocer el orden y la relación entre las corrientes superficiales y los cuerpos de agua.
- Las características geomorfológicas, especialmente las morfométricas, las cuales se pueden analizar y determinar directamente a partir de los mapas topográficos.
- Características del régimen climático, representadas por isoyetas e isotermas, que se presentan en mapas climáticos y meteorológicos especiales.
- Características fisiográficas generales como la litología, los suelos, la cobertura vegetal, etc.
- Los *factores morfométricos* son básicos para caracterizar morfológicamente las cuencas hidrográficas y determinar datos hidrológicos en puntos de interés para la construcción de mapas temáticos (escorrentía, rendimiento).

Los factores morfométricos y fisiográficos que presentan mayor interés en el proceso de generalización, determinación y cálculo indirecto de parámetros hidrológicos son los siguientes:

- *Morfométricos*: área de la cuenca, perímetro, longitud de la corriente, forma, sinusoidad, densidad y patrón de drenaje, elevación media de la cuenca, forma de la cuenca, pendiente media de la corriente, pendiente media de la cuenca, tiempo de concentración.
- *Fisiográficos*: relieve, tipos de drenaje, tipos de suelo, erosión, coberturas forestal y vegetal, geología. (Stanescu, 1969).

La metodología para la determinación de las características morfométricas de las cuencas se encuentra ampliamente documentada en la literatura y en manuales de hidrología y recursos hidráulicos (Aparicio, 1992; Heras, 1976; Monsalve, 2009; WMO, 2008).

Otras referencias de apoyo son Stanescu Silviu, 1969, "Apuntes de clase para el curso de hidrología práctica"; Chow, 1994, Características del régimen hidrológico en las cuencas "Hidrología Aplicada"; Linsley y Paulus, 1997, "Hidrología para Ingenieros"; y en Delgadillo S. Alejandro, "Morfometría de Cuencas".

1.2.2. Características del régimen hidrológico

De acuerdo con lo presentado en la Figura 18, las características del régimen hidrológico se analizan principalmente con el régimen de caudales en sus aspectos de:

- *Variabilidad y estacionalidad* a partir de valores característicos de *caudales* anuales, de caudales mensuales (principalmente) y sus valores extremos máximos y mínimos.
- *Distribución de caudales* con el análisis de frecuencia de caudales y regionalización de caudales máximos y mínimos.
- *Variabilidad y estacionalidad* de concentración y transporte de sedimentos.

En la Tabla 1 se muestran algunos componentes básicos para la caracterización del régimen de caudales; varios de sus aspectos se determinan a partir del análisis de frecuencias de caudales diarios (curva de duración de caudales).

Tabla 1. Componentes y parámetros para la caracterización del régimen de caudales

COMPONENTE RÉGIMEN NATURAL		ASPECTO	PARÁMETRO
VALORES NORMALES	Anuales y mensuales	Magnitud	Promedio de caudales anuales
		Variabilidad	Diferencia entre caudal máximo mensual y caudal mínimo en el año
		Estacionalidad	Mes de caudal máximo y mínimo en el año
	Diarios	Variabilidad	Diferencia entre los caudales medios diarios correspondientes a los percentiles de excedencia del 10% y 90% en la curva de duración de frecuencia de caudales diarios.
		Magnitud y frecuencia	Media de los máximos caudales diarios anuales
VALORES EXTREMOS	Máximos (avenidas)	Magnitud y frecuencia	Caudal correspondiente a la avenida normal (percentil de excedencia del 5% de la curva de duración de caudales diarios)
		Variabilidad	Coefficiente de variación de la serie de máximos caudales diarios anuales
		Duración	Máximo número de días consecutivos con caudal medio diario mayor de Q5%
		Magnitud y frecuencia	Media de los mínimos caudales diarios anuales. Caudal correspondiente a la sequía habitual (percentil de excedencia del 95% en la curva de caudales diarios clasificados)
	Mínimos (sequías)	Variabilidad	Coefficiente de variación de la serie de mínimos caudales diarios anuales.
		Estacionalidad	Número medio de días al mes con caudal medio diario <Q95%.
		Duración	Máximo número de días consecutivos con caudal medio diario <Q95% Número medio de días al año con caudal diario cero

Fuente: modificado de (Martínez, Fernández, 2006)

Análisis de frecuencias de caudales

El análisis de frecuencias de caudales medios diarios en sitios específicos de cuencas es representativo del *régimen de caudales* medios de la corriente y por lo tanto sirve para evaluar el régimen hidrológico y en alguna medida el comportamiento del régimen futuro de caudales.

La curva de duración de caudales es una curva de frecuencias acumuladas que expresa el porcentaje de tiempo durante el cual un caudal determinado puede ser igualado o excedido. Esta curva tiene formas típicas que dependen de las características de las cuencas. En cuencas de montaña, la pendiente pronunciada en el tramo inicial de la curva indica que los caudales altos se presentan durante períodos cortos, mientras que en los ríos de llanura no existen diferencias muy notables en las pendientes de los diferentes tramos de la curva. De estas curvas se derivan también los caudales característicos de una cuenca, tales como:

- *Caudal característico máximo*: caudal rebasado 10 días al año.
- *Caudal medio característico*: caudal rebasado 6 meses por año (caudal de frecuencia 50%).
- *Caudal característico de sequía*: el caudal rebasado 355 días por año. Este caudal es siempre mayor que el caudal absoluto de sequía (que es el caudal más bajo registrado en el período de observación).

Los valores característicos de la serie de caudales medios multianuales en los puntos de monitoreo hidrológico (estaciones) presentan un interés práctico porque con ellos se definen las condiciones hidrológicas secas de una región (caudales mínimos), las condiciones hidrológicas húmedas (caudales máximos) y las condiciones medias o normales (caudales medios mensuales).

Los caudales medios mensuales multianuales y los caudales medios diarios son la base para construir la curva de duración de caudales, herramientas estas de gran valor para determinar el régimen hidrológico de las cuencas.

El régimen hidrológico de una región se analiza igualmente a partir de la escurrentía asociada a condiciones climáticas normales (media), seca y húmeda. Para el análisis son necesarias las series de caudales medios mensuales multianuales, mínimos y máximos de los medios multianuales.

La curva de duración de caudales resulta del análisis de frecuencias de la serie histórica de caudales medios diarios y es representativa del régimen de caudales medios de la corriente. Cuando no se cuenta con estas series representativas se genera a partir de modelos lluvia escurrentía.

Las unidades hídricas espaciales de análisis se caracterizan individualmente a través de *curvas típicas de duración de caudales medios diarios* donde el eje de las ordenadas representa el módulo de normalización (caudal Q_i sobre el caudal

promedio de la serie (Q_i/Q_{promedio}) o solamente el caudal promedio (Q_{promedio}) y en las abscisas el porcentaje (%) de tiempo (año, mes o día) que es igualado o excedido en un periodo de tiempo. Con estas curvas se analizan las condiciones de disponibilidad y variabilidad del recurso agua en la cuenca de estudio. La tendencia de la curva refleja las condiciones de regulación natural y el régimen de la corriente para el período estudiado, considerándose como una "curva típica" de frecuencias acumuladas. La pendiente de la curva es indicativa de la capacidad de regulación de la cuenca, que depende de la cobertura vegetal, de la pendiente del terreno y del tipo de suelo entre otros factores, e identifica también la torrencialidad de la corriente (ríos de montaña).

La fuente básica de información está en las series de caudales medios, preferiblemente con extensión superior a 20 años obtenidas de las estaciones de la red nacional de monitoreo y de redes regionales de las autoridades ambientales y otras entidades.

En las evaluaciones regionales del agua se utilizan para análisis del régimen hidrológico como insumo base en la construcción del indicador de regulación hídrica y la estimación del caudal ambiental. Igualmente en el análisis para la regionalización de caudales máximos y mínimos.

Las siguientes referencias nacionales e internacionales contienen de forma detallada metodologías relacionadas con el análisis de frecuencia de caudales: Unesco, 1981, *Guía internacional de investigación y método*; IDEAM, *Guía y protocolos del monitoreo y seguimiento del agua*, 2006; OMM, *Guía de prácticas hidrológicas 1994 y 2008*; y SCHM, Stanescu S., 1969, *Apuntes de clase para el curso de hidrología práctica*.

Regionalización de caudales

La regionalización hidrológica de caudales máximos permite, mediante la información existente en una determinada unidad hidrográfica de análisis, estimar esta variable hidrológica en lugares carentes de datos o bien donde los existentes resultan insuficientes por cantidad o por calidad. La regionalización, como lo menciona Tucci (1993) puede ser utilizada para analizar los datos tanto de caudales máximos como de mínimos y en consecuencia mejorar su calidad. Igualmente, es una herramienta importante para identificar la falta de puestos de observación en regiones hidrológicamente homogéneas. En los proyectos de infraestructura y de impacto ambiental es una ayuda muy importante para el diseño de obras hidráulicas y para identificar zonas de riesgo hidrológico, entre otros.

El proceso metodológico para la construcción de las ecuaciones de regionalización parte de un análisis estadístico de las variables hidrológicas, la utilización de diferentes distribuciones de probabilidad teórica y se recurre a técnicas o métodos de Bondad de Ajuste como los de Chi Cuadrado, Kolmogorov y Smirnov, que permiten identificar la distribución que mejor se ajusta a la serie de caudales.

Regionalización de caudales máximos en cuencas torrenciales

En este aparte se presenta un marco metodológico donde se aplican un conjunto de técnicas y procesos tendientes a definir un criterio de regionalización de crecidas en cuencas de régimen torrencial, estas últimas muy dadas en nuestro sistema montañoso.

El criterio para la regionalización se fundamenta en la base geográfica, en el conocimiento morfológico de las cuencas y en las características hidrológicas de zonas climáticamente homogéneas.

Dentro de las diversas maneras para determinar caudales máximos en un determinado lugar, están los métodos determinísticos, basados en modelos que se deben ajustar a cuencas hidrográficas y posteriormente calibrarse a fin de obtener la esorrentía producida por una lluvia. Igualmente otra metodología es utilizar fórmulas empíricas cuyos resultados son ecuaciones representativas como el método del “**Caudal Índice**” muy utilizado en Honduras y Guatemala por su sencillez en la regionalización de caudales máximos (Erazo,2004 y Aguilera, 2010).

El procedimiento metodológico general para la regionalización de caudales máximos en cuencas de régimen torrencial se presenta en el flujograma de la Figura 19.

Selección del área hidrográfica para regionalización:

Se refiere al área que cubre la zona de interés hidrológico donde se realiza el análisis y las cuencas que la integran.

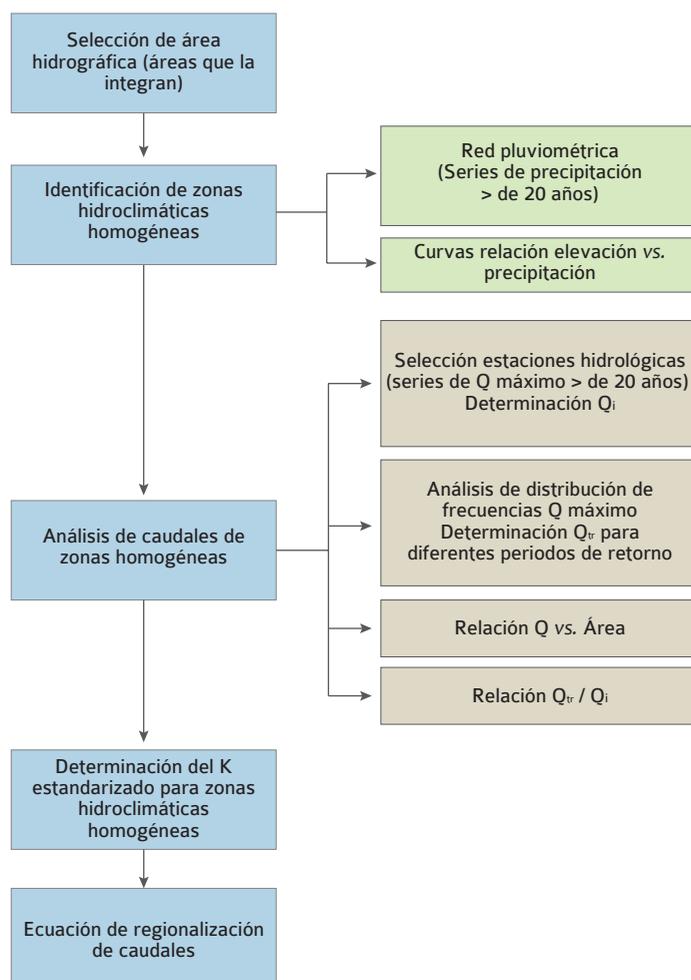


Figura 19. Flujo para regionalización de caudales máximos

Determinar zonas climáticamente homogéneas:

Se identifican las estaciones de la “Red pluviométrica” dentro del área de interés y las series de Precipitación anual multianual. Se realiza una correlación entre la “Elevación (msnm) vs. Precipitación” para cada estación seleccionada con series de precipitación anual multianual preferiblemente mayores a 20 años para identificar las zonas climáticamente homogéneas, como se muestra en la Figura 20.

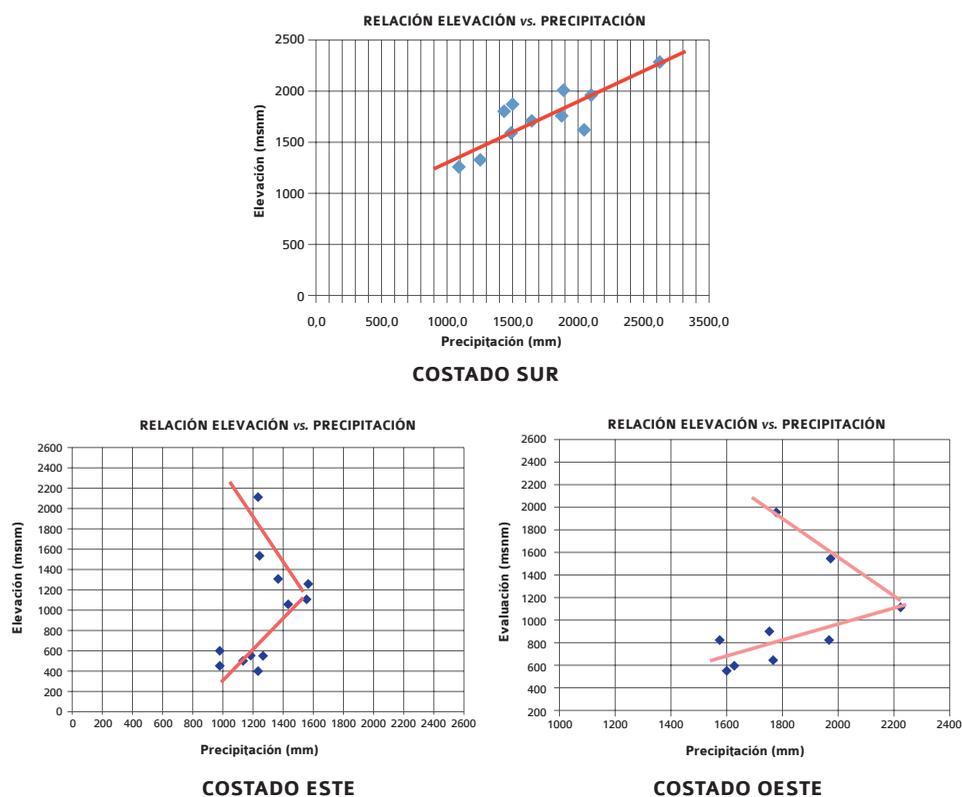


Figura 20. Relación Elevación (msnm) vs. Precipitación - Cuenca alta del río Magdalena

Análisis de caudales máximos en zonas homogéneas:

Una vez identificadas las zonas climatológicamente homogéneas se seleccionan las estaciones hidrológicas con “Series de caudales máximos” con periodo mínimo de 20 años. Se realiza el “Análisis de distribución de frecuencias” con cada una de las series de caudales máximos utilizando las distribuciones de mayor aplicación como: Pearson Tipo III, Log Pearson Tipo III, Normal, Log. Normal y Gumbel. Para cada una de las distribuciones señaladas se obtienen los factores estadígrafos (coeficientes de variación, asimetría, kurtosis, entre otros) y en función de ellos se calculan los caudales para diferentes periodos de retorno “Determinación caudales de retorno”.

Con el caudal máximo medio en cada estación o “Caudal índice” se establece la “Relación caudal máximo (Q_{mx}) vs Área aferente (A) Q” a la estación hidrológica correspondientes (Ecuación 3). Figura 21.

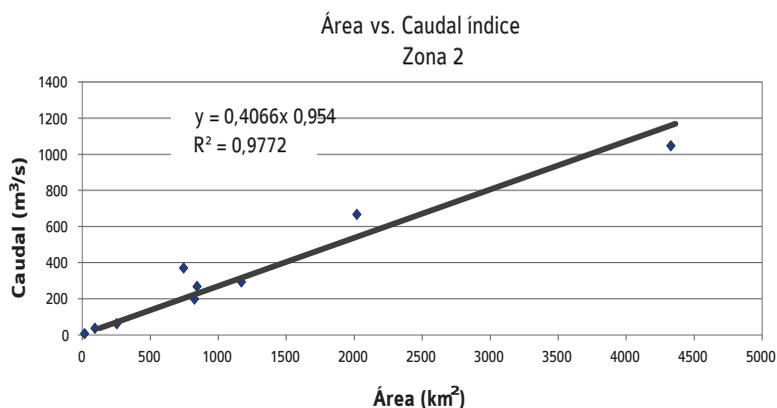


Figura 21. Relación área vs. Caudal índice

$$Q_i = CA^n$$

Ecuación 3

Si la correlación es buena se verifica la homogeneidad hidroclimática de la zona.

Determinación del K estandarizado para zonas hidroclimáticas homogéneas:

Con los caudales índice (Q_i) y caudal de retorno (Q_{Tr}), se establece una relación para periodos de retorno (Tr) de cada estación (2, 5, 10, 20, 50, 100 y 200 años). Luego se determina el factor “K” estandarizado con los valores obtenidos para cada una de las estaciones ubicadas dentro de la zona climáticamente homogénea.

Con estos valores de K determinados para las estaciones hidrológicas y para cada período de retorno se calcula un K promedio estandarizado para las áreas climáticamente homogéneas.

Con estos valores de “K” estandarizado y los caudales índice (determinados según la Ecuación 3) se establece la ecuación de regionalización siguiente:

$$Q_{Tr} = K_{Tr} * Q_i$$

Ecuación 4

Donde:

Q_{Tr} : caudal (m^3/s) para un determinado período de retorno (años) para un área específica dentro del área hidrográfica homogénea.

Q_i : caudal índice (m^3/s), tomado de la gráfica de la Figura 21 para el área específica.

K_{Tr} : valor adimensional estandarizado obtenido en la curva de frecuencia ó en las tablas definidas para cada caso en especial.

A: área de la cuenca hasta el punto de observación (km^2).

Con la Ecuación 4 para cada zona homogénea se pueden estimar los Q máximos para diferentes períodos de retorno en cualquier sitio dentro del área hidrográfica homogénea.

1.2.3. Elementos metodológicos para evaluación de sedimentos

Monitoreo de sedimentos

El transporte de sedimentos en los cauces está gobernado por la turbulencia y las formas de los lechos de los ríos, lo cual imprime al proceso un carácter muy variable en el tiempo y el espacio (IDEAM 2007)³. Con los conocimientos y tecnologías actuales, aún no se ha podido establecer una fórmula simple para cuantificar el transporte de los sedimentos en los cauces fluviales. Es por ello que para poder establecer la magnitud del transporte sólido y conocer de manera aproximada el comportamiento sedimentológico en una cuenca, se realizan mediciones puntuales en los cauces durante diferentes condiciones hidrológicas o estados de los niveles del río (niveles bajos, medios, altos).

De manera general, la carga total de sedimentos que transporta un río tiene un componente en suspensión y uno de fondo. Para determinar el transporte de sedimentos en suspensión existen equipos y metodologías descritas en el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento del Agua del IDEAM, al igual que para la medición de la carga de arrastre de fondo.

El IDEAM cuenta con una red de monitoreo de los sedimentos en los principales ríos de Colombia desde mediados de los años 80. Alrededor de 140 estaciones de la red hidrológica actual, además de contar con series de niveles y caudales, se realizan aforos sólidos sistemáticos que permiten calcular el transporte de sedimentos en suspensión una vez se conocen las relaciones entre el caudal líquido con el caudal sólido y entre la concentración media con la concentración superficial. De esta forma es posible la generación de series estimadas de transporte de sedimentos en suspensión diario en estas estaciones.

Aunque de manera menos frecuente, espacial y temporalmente se realizan muestreos del fondo para determinar las curvas granulométricas, las cuales permiten realizar análisis de los tamaños que conforman el material de fondo en un río: gravas, arenas, limos y arcillas. En los cauces naturales existe una gran cantidad de tamaños, que pueden variar desde pequeñas partículas coloidales hasta grandes bolos o rocas de varios metros de diámetro. Adicionalmente, en 60 estaciones se tiene implementado el monitoreo de las concentraciones superficiales, lo cual permite generar series de concentración de sedimentos en suspensión a nivel diario.

Modelación de procesos sedimentológicos a escala de cuenca

Cuando se trata de determinar la respuesta sedimentológica de una cuenca hidrográfica, se deben considerar con antelación los procesos hidrológicos

relevantes, puesto que son los flujos de agua los encargados de erodar y transportar las partículas de sedimentos. Además, las geoformas generadas por dichos procesos condicionan la respuesta hidrológica; de tal forma hay una relación dinámica entre la hidrología y la geomorfología. Dicha relación presenta una variabilidad espacial y temporal, tanto de los procesos como de los parámetros, la cual debe ser tenida en cuenta en la modelación de procesos sedimentológicos. El IDEAM avanza en la conceptualización y validación de metodologías para el análisis de los procesos sedimentológicos a escala de cuenca y en la investigación y modelación de los procesos de erosión.

Es difícil efectuar un análisis cuantitativo para determinar la cantidad de sedimentos disponibles en una corriente de agua debido a la complejidad de procesos físicos actuantes en toda el área de captación y a la variabilidad espacial y temporal de todos los parámetros involucrados en la erosión superficial, los desprendimientos de banca y movimientos en masa que se dan en un evento de lluvia particular. Sin embargo, la capacidad de transporte de sedimentos en un cauce puede tratarse de una forma analítica.

Evaluación del comportamiento general y rendimiento medio diario de los sedimentos

En este contexto con la información existente se pueden identificar las cuencas con mayor producción de sedimentos por unidad de área y la variación del transporte de sedimentos en suspensión a partir de las variables hidrológicas, medidas de manera sistemática en los puntos de referencia de la red de estaciones del IDEAM. Sin embargo, es necesario que a nivel regional se cuente con información de las cuencas que integran la regionalización hidrográfica de las autoridades ambientales que permita una aproximación adecuada del tema de sedimentos. Con este propósito se requiere analizar la necesidad de complementar la red de estaciones de monitoreo del IDEAM en el marco del Programa Nacional de Monitoreo.

La metodología para evaluar el comportamiento general y rendimiento medio de sedimentos utilizada para la evaluación a nivel nacional se puede consultar en el ENA, 2010 (IDEAM, 2010a).

1.2.4. Procedimiento para la evaluación y la caracterización de la oferta hídrica superficial y su disponibilidad

El cálculo de la oferta hídrica superficial abarca los aspectos relacionados con la oferta hídrica total, la oferta hídrica natural disponible (IDEAM, 2010a), la oferta hídrica regional disponible y la oferta hídrica regional aprovechable.

El procedimiento metodológico general para la determinación de las características de la oferta en las regiones se presenta en el flujograma de la Figura 22, en la

cual se ilustran los pasos a seguir para determinar la oferta hídrica superficial para cuencas intervenidas y no intervenidas.

En concordancia con los conceptos definidos para régimen hidrológico sobre régimen de caudales natural y régimen de caudales alterado se consideran cuencas intervenidas y no intervenidas.

Cuenca intervenida: es aquella que por la presión de las diferentes actividades que se desarrollan en ella, se extrae un volumen de agua permanente y constante. En estos casos en particular se debe hacer el análisis teniendo en cuenta las condiciones de régimen natural o realizando un inventario de entradas y salidas hasta el punto de interés hidrológico.

Cuencas no intervenidas o poco intervenidas: se refieren en general a las cuencas que no tienen una presión alta de demanda hídrica o que, por su magnitud de caudal, la sustracción de agua no representa variaciones sustanciales en los promedios de las series de caudales.

En el flujograma de la Figura 22 se reconocen los tipos de oferta para la evaluación regional. En términos generales se distinguen la *Oferta Hídrica Total Superficial (OHTS)*, la *Oferta Hídrica total Disponible (OHTD)*, la *Oferta Hídrica Regional Disponible (OHRD)* y la *Oferta Hídrica Regional Aprovechable (OHRA)*.



La **Oferta Hídrica Total Superficial (OHTS)** se determina con la variable *escorrentía*, que se calcula a partir de la serie histórica de caudales medidos seleccionando estaciones hidrológicas representativas de cuencas con régimen poco intervenido o a partir de modelos lluvia escorrentía donde no hay estaciones hidrológicas o estas son poco representativas. El balance hídrico permite verificar los estimativos de escorrentía y evaluar los componentes de precipitación y de evapotranspiración del ciclo hidrológico.

La **Oferta Hídrica Total Disponible (OHTD)** representa el caudal disponible (Q_d) después de sustraer el caudal ambiental (Q_{amb}) del caudal total superficial (Q_t) en cuencas poco intervenidas.

La **Oferta Hídrica Regional Disponible (OHRD)** o caudal disponible regional (Q_{dr}) se determina al sustraer del caudal total superficial (Q_t) la sumatoria de las extracciones del caudal ambiental (Q_{amb}), los caudales de retorno (Q_r) y los caudales de trasvase (Q_{tr}) si existen, ya sea hacia la cuenca o desde la cuenca respectivamente. Los caudales medidos en estaciones localizadas en cuencas intervenidas representan este caudal disponible regional (Q_{dr}) que en términos generales corresponde a la expresión de la Ecuación 5.

$$Q_{dr} = Q_t - Q_{amb} + Q_r \pm Q_{tr}$$

Ecuación 5

Donde:

Q_t : caudal total (el que determina OHT)

Q_{amb} : caudal ambiental

Q_r : caudal de retorno

Q_{tr} : caudal de trasvase (positivo si entra a la cuenca, negativo si sale de la cuenca).

En esta ecuación los diferentes caudales corresponden a las definiciones siguientes:

- **Caudal extraído:** calculado con la sumatoria de las demandas para los diferentes usos. Las premisas y procedimientos metodológicos para el cálculo o estimación de estas extracciones para los diferentes sectores usuarios se desarrollan en la Parte II del Capítulo 3 de este documento.
- **Caudal de retorno:** caudal extraído que retorna a las corrientes y cuerpos de agua después de ser usado por los diferentes sectores. Los tiempos, cantidad y lugar del retorno dependen de la actividad y la región. Cuando este caudal no se ha monitoreado se puede considerar un porcentaje teniendo en cuenta ciertas consideraciones.

De acuerdo con las especificaciones del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) (MAVDT, 2000), el agua para uso doméstico tiene coeficientes de retorno que pueden variar en promedio entre 0.75 y 0.85, según el nivel de complejidad del sistema. Este caudal de retorno debe ser medido

en campo, y debe considerar aspectos importantes existentes del sistema de alcantarillado, tales como los pozos sépticos (cuando estos existen no se realizan vertimientos a las fuentes) o los puntos de vertimientos del sistema (que sí obedecen a un programa de manejo, disposición y recolección de vertimientos).

Cada uno de los sectores productivos en función de los procesos específicos, la tecnología, grado de reutilización del agua genera retornos diferenciados. Es necesario avanzar en la investigación y medición de caudales de retorno, en particular para el sector agrícola e industrial.

- **Caudal de trasvase:** el trasvase se define como la cantidad de agua que se desvía de una corriente de agua propia de una cuenca hacia otra, para cumplir un fin específico. El caudal de trasvase puede ser positivo o negativo si el caudal entra a la cuenca o si sale de ella.
- **La Oferta Hídrica Regional Aprovechable (OHRA), o caudal hídrico regional aprovechable (Q_{hra}),** resulta de sustraer del caudal medido en la estación (Q_{est}) el caudal ambiental (Q_{amb})

En términos de caudales, esta oferta se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q_{hra} = Q_{est} - Q_{amb}$$

Ecuación 6

Donde:

- Q_{hra} : caudal hídrico regional aprovechable
- Q_{est} : caudal medido en la estación representativa
- Q_{amb} : caudal ambiental

- **Caudal ambiental:** al igual que en el Estudio Nacional del Agua 2010 (IDEAM, 2010a), el caudal ambiental se estima a partir de las características del régimen hidrológico representadas en la curva de frecuencias de caudales diarios (curva de duración de caudales), la cual sintetiza las características del régimen en un punto específico de la unidad hídrica de análisis.

No existe un método ideal para determinar el caudal ambiental apropiado para cada caso específico; pero si existen una serie de métodos para determinar el caudal ambiental de acuerdo con criterios y objetivos, entre los cuales se pueden agrupar una serie de métodos:

- » **Hidrológicos:** se basan en conocimiento del régimen hídrico a partir de información de las series históricas de caudales en sitios de interés.
- » **Hidráulicos:** se considera la conservación del comportamiento y dinámica del ecosistema fluvial a lo largo de la distribución longitudinal del río.

- » *Biológico microbiológico*: correspondencia del hábitat (fauna y flora) considerando los caudales necesarios para la supervivencia de las especies en desarrollo.
- » *Aspectos integrales*: identificación de caudales requeridos para las necesidades humanas (calidad del recurso, usos socioeconómicos, investigación, bienes y servicios, etc.).

Como una aproximación inicial, se considera la estimación del caudal ambiental a partir de las características del régimen hidrológico. Es un estimativo general que no reemplaza la evaluación que debe hacerse a nivel regional o local. En este sentido el MADS y el IDEAM definirán los conceptos y metodologías para el cálculo del caudal ambiental, en cumplimiento del Decreto 3930 de 2010.

El procedimiento general para el cálculo del caudal ambiental a partir de las características del régimen hidrológico se presenta en el esquema de la Figura 23.

El flujograma ilustra el procedimiento para determinar el caudal de sustracción (Q ambiental) a partir de la curva de duración de caudales diarios medidos en las estaciones y la curva de duración de caudales mensuales generados como resultado de los modelos lluvia caudal. Incluye el procedimiento para el cálculo de un factor para ajustar el caudal ambiental obtenido a partir de la curva mensual a uno representativo a nivel diario basado en datos de estaciones con series históricas.

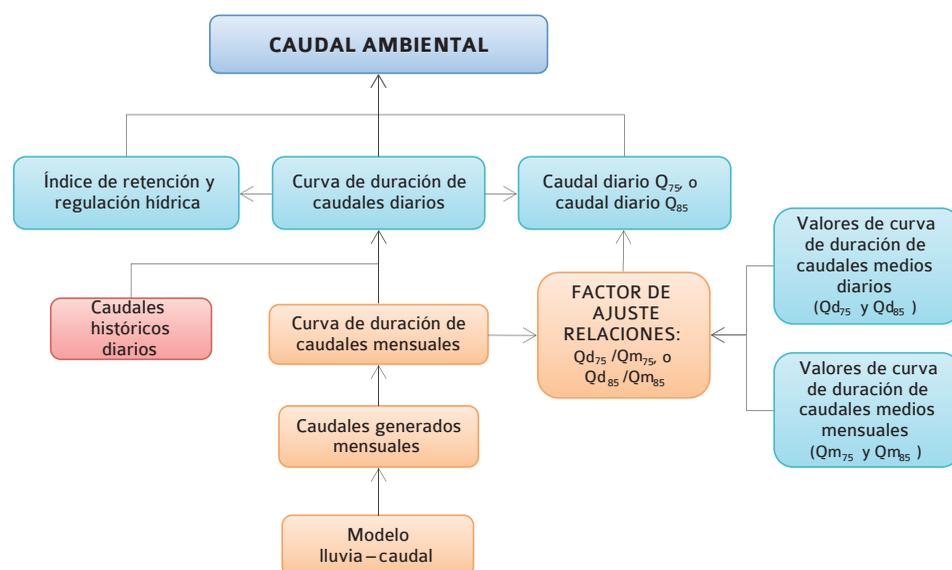


Figura 23. Procedimiento para la determinación del caudal ambiental

1.2.5. Métodos y técnicas para evaluar la oferta hídrica superficial

La determinación de la escorrentía se realiza a partir de series históricas de caudales, valores generados por modelación o por balance hídrico:

Cálculo de oferta a partir de series de caudales diarios medidos

Dado que la información disponible de caudales, asociados a la red de estaciones del IDEAM, autoridades ambientales u otras entidades, corresponde a mediciones puntuales, se deben utilizar métodos de interpolación para convertir los caudales en información distribuida. De esta manera es posible determinar la oferta en las unidades hídricas de análisis a partir de isolíneas de escorrentía que cubren el área. Los métodos utilizados para la interpolación se describen en el apartado 1.2.8.

Cálculo de la oferta a partir de modelo lluvia-caudal

En el evento de que no existan las series de caudales históricos, estos deberán generarse con la aplicación de modelos hidrológicos lluvia escorrentía, donde la mayoría requiere componentes básicos como: precipitación diaria, uso actual y potencial del suelo, tipo de coberturas forestal y vegetal, y la determinación de las características morfométricas y fisiográficas de las cuencas hidrográficas. Para confirmación de los resultados, se deberán realizar aforos en las fuentes de estudio, en especial al final del período de estiaje para estimar el caudal mensual base.

La modelación hidrológica está ampliamente documentada en la literatura. La OMM, en la Guía de Prácticas Hidrológicas, Capítulo 6 “Modelización de Sistemas Hidrológicos”, incluye referencias en las que se puede obtener información sobre ciertos aspectos de la modelación hidrológica⁴.

Cálculo de la oferta a partir del balance hídrico

La determinación de los componentes de la ecuación del balance (Ecuación 1) precipitación; evapotranspiración real; escorrentía total; cambio de almacenamiento y término residual de discrepancia se plantea a partir de diferentes métodos y técnicas. que pueden ser consultadas en la literatura hidrológica. Particularmente, se sugiere la aplicación propuesta por el Programa Hidrológico Internacional de la Unesco (Unesco, 2006b).

En este sentido, para determinar los caudales por Balance Hídrico, se propone en este documento aplicar la fórmula de BUDYKO para encontrar la variable evapotranspiración real (ETR), la cual está en función de la evapotranspiración

4 La guía puede consultarse en: http://www.whycos.org/hwrp/guide/chapters/spanish/original/WMO168_Ed2009_Vol_II_Ch6_Up2008_es.pdf.

potencial (ETP) y la precipitación (p), e incorpora otros componentes como el área de la cuenca para generar rendimientos y caudales.

Para el análisis y cálculo de la precipitación en una región determinada se debe considerar la red que existe dentro de ella y por fuera de ella, con la cual se construye el mapa de Isoyetas. Para los estudios regionales se puede tomar como base inicial el *Atlas Climatológico de Colombia*, IDEAM 2005, elaborado por la Subdirección de Meteorología del IDEAM (IDEAM, 2005).

La evapotranspiración real (ETR) es uno de los componentes básicos de la ecuación del balance hídrico. Esta se obtiene aplicando fórmulas de diferentes autores donde se interrelacionan variables como la precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial (ETP). Unas de las ecuaciones que se aplican en el cálculo de la ETR son las de BUDYKO y TURC:

Para Budyko, la ETR responde a la siguiente ecuación:

$$ETR = [(ETP * P * \tanh(P/ETP)) (1 - \cosh(ETP/P) + \sinh(ETP/P))]^{1/2}$$

Ecuación 7

Donde:

- P: precipitación (mm)
- ETR: evapotranspiración real (mm)
- ETP: evapotranspiración potencial (mm)

Según Turc, la ETR corresponde a la siguiente ecuación:

$$ETR = P / (0.9 + (P^2 / L^2))^{1/2}$$

Para (p/L) > 0.316

Ecuación 8

Donde:

- ETR: evapotranspiración real (mm)
- P: precipitación (mm)
- L: factor heliotérmico
- $L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$

"T" es la temperatura media anual en grados centígrados.

Para obtener valores de evapotranspiración potencial en puntos de elevaciones o altitudes donde no se dispone de este tipo de información, se establece la relación entre la elevación y la *evapotranspiración potencial (ETP)*. En la Figura 24 se presenta un ejemplo para las estaciones climatológicas ubicadas en el departamento del Huila.

Con las relaciones altura vs. precipitación y altura vs. ETP, se obtienen las variables necesarias para aplicar la fórmula de BUDYKO en la ETR.

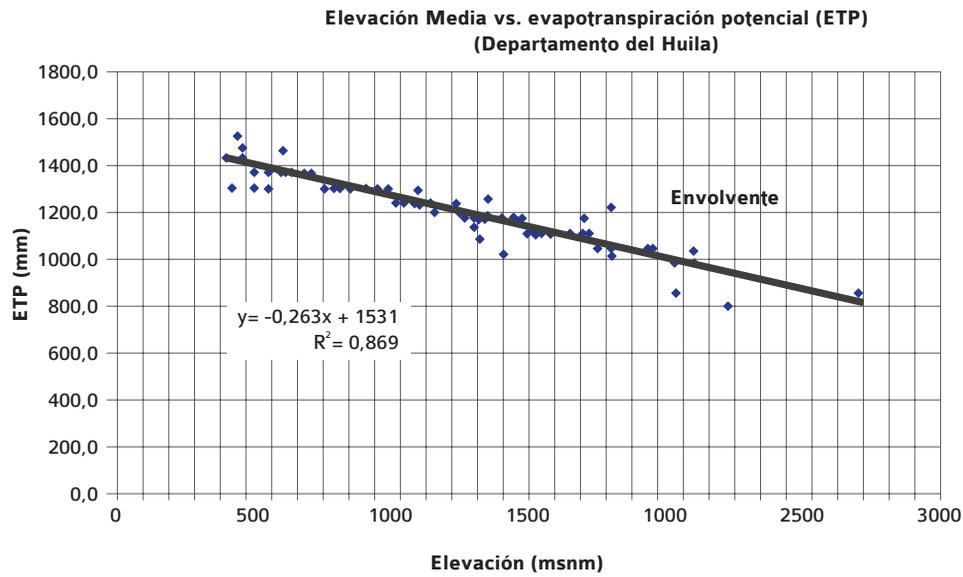


Figura 24. Relación elevación vs. evapotranspiración potencial

Con la información de precipitación y evapotranspiración real generadas a partir de los datos disponibles de estaciones meteorológicas y con el apoyo de métodos de interpolación para convertir la información puntual en información distribuida, se aplica la ecuación general de balance hídrico para el período considerado y se genera la variable escorrentía, la cual se compara con datos de caudal medidos en estaciones representativas de la cuenca a fin de validar su precisión (Figura 25).

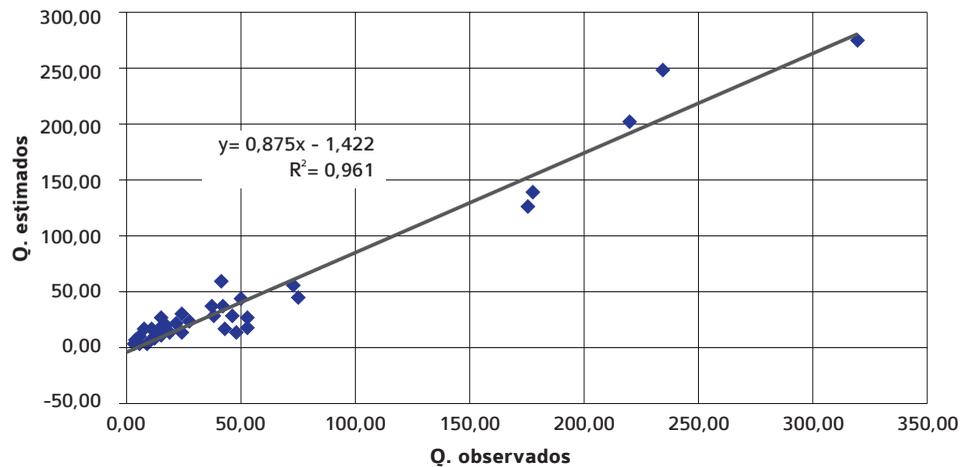


Figura 25. Caudales estimados vs. caudales observados

Con las gráficas de comparación de los caudales en una determinada estación hidrológica que resultan del cálculo del balance hídrico en el mismo lugar de la estación se verifica la validez de las estimaciones (correlaciones mayores de 0.85), lo cual a su vez permite deducir información de caudales o rendimiento hídrico para diferentes sitios de la cuenca.

1.2.6. Instrumentos

Los instrumentos técnicos más apropiados y relevantes para la estimación de la oferta hídrica superficial están asociados con la medición y adquisición de datos al Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico y la estrategia para su implementación, los protocolos y estándares de monitoreo y seguimiento del agua y el registro de usuarios del recurso hídrico.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM), en la Guía de Prácticas Hidrológicas, hace recomendaciones sobre las densidades mínimas de estaciones adecuadas a cada tipo de región, teniendo presente que se deben cumplir las siguientes condiciones esenciales (OMM, 1994; WMO, 2008):

- Que cada estación debe reflejar las características del régimen del área aferente.
- Que exista una distribución racional de las estaciones, de acuerdo a la variación territorial de los principales elementos genéticos de este. En tal sentido, por ejemplo, rendimiento (q) vs. elevación media (Hm) y/o el caudal (Q) vs. área (A), son satisfactorias para la generalización de datos hidrométricos.

De acuerdo con estas pautas, la densidad mínima de la red de estaciones climatológicas, pluviométricas e hidrológicas en zonas planas, onduladas y de montaña se especifican en la Tabla 2 (WMO, 2008).

Tabla 2. Densidad mínima de estaciones recomendadas (área en km² por estación)

Unidad fisiográfica	Precipitación		Evaporación	Caudales	Sedimentos	Calidad de agua
	Registro discreto	Registro continuo				
Costas	900	9000	50000	2750	18300	55000
Montañas	250	2500	50000	6700	20000	20000
Zonas planas interiores	575	5750	5000	12500	37500	37500
Zonas de lomeríos	575	5750	50000	12500	47500	47500
Pequeñas islas	25	250	50000	2000	6000	6000
Áreas urbanas	-	10-20	-	-	-	-

Fuente: Modificada de WMO, 2008.

De esta forma, la solución más efectiva de organizar una red de puntos de observación, en una región determinada, es definir un número de puntos suficientes de investigación distribuidos de tal manera que cubra de forma homogénea la superficie considerada, teniendo en cuenta los principales factores genéticos del régimen hidrológico.

El número de estaciones o puntos de control quedaría definido por la necesidad de las autoridades ambientales de administrar de una manera efectiva y racional

el recurso hídrico en su área de jurisdicción, a través de herramientas sencillas y prácticas como los mapas temáticos de precipitación, escorrentía y rendimiento. Para definir el número de estaciones de la cuenca hidrológica regional, teniendo en cuenta los criterios del párrafo anterior, se propone definir el número de estaciones o puntos de observación hidrológica que debería tener una cuenca hidrográfica, considerando cuatro situaciones:

- Cuencas menores de 500 km² de superficie
- Cuencas entre 500 y 2000 km² de superficie
- Cuencas entre 2000 y 3500 km² de superficie
- Cuencas entre 3500 y 5000 km²

El criterio para precisar el número de estaciones en cada caso se observa en la Tabla 3 y en la Figura 26.

Tabla 3. Área de influencia y número de estaciones

ÁREA CUENCA km ²	ÁREA DE INFLUENCIA km ²	NÚMERO ESTACIONES
Menores de 500	100	5
500-2000	200	5-10
2000-3500	250	10-14
3500-5000	300	14-18

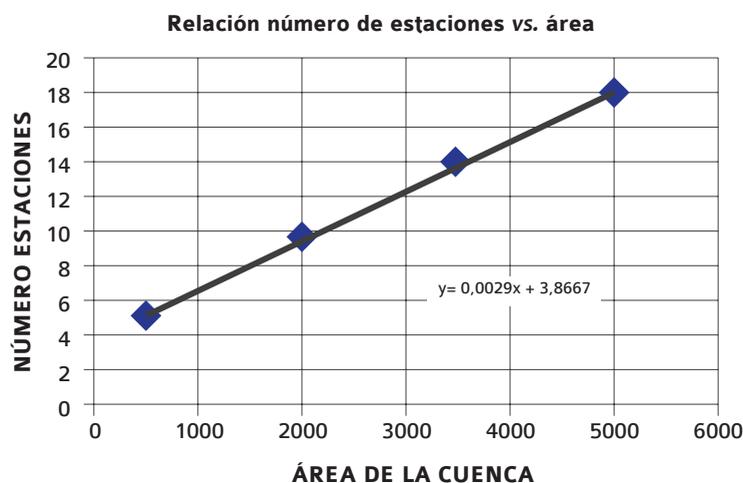


Figura 26. Área de influencia y número de estaciones

Con la Figura 26, se estimará el número de estaciones necesarias de acuerdo con el área de la zona o subzona de estudio, siendo "Y" número de estaciones y "X" el área de la cuenca en estudio.

$$y = 0,0029x + 3,8667$$

Ecuación 9

Donde:

Y: número de estaciones o puestos de monitoreo

X: área de la cuenca hidrográfica

El propósito es contar con un número suficientes estaciones en cada zona, subzona o cuenca para que se puedan construir mapas de escurrimiento y rendimientos a una escala de precisión tal que los valores generados sean realmente representativos.

1.2.7. Información

A nivel nacional, las principales fuentes de información son el Sistema de Información Ambiental (SIA) y el módulo Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH), coordinados por el IDEAM, donde se consolidan las bases de datos alfanuméricas y espaciales de variables hidrológicas, meteorológicas asociadas a mediciones en la red nacional de monitoreo. Igualmente, almacena datos, información y productos generados a partir de estas series históricas e información ambiental. Integra, además, información socioeconómica que se recoge con la aplicación de instrumentos como el registro de usuarios, inventario de agua subterránea (FUNIAS), registro único ambiental, etc.

A nivel regional, la principal fuente son los sistemas de información de las Corporaciones Autónomas Regionales, Autoridades Ambientales Urbanas, Parques Naturales Nacionales, entes territoriales e instituciones asociadas a las gobernaciones y municipios. La principal herramienta para adelantar este tipo de estudios es sin duda el contar con información hidrometeorológica y con una cartografía adecuada.

Es igualmente necesario contar con información secundaria de referencia, como mapas temáticos de isoyetas, de isolíneas, de ETP y de temperatura.

La información hidrológica y climatológica se utiliza inicialmente para la calibración del modelo hidrológico "lluvia-caudal" y para estimar el caudal en los sitios seleccionados a través del balance hídrico. Una de las dificultades que se encuentra a menudo es la falta de información de precipitación por la carencia de estaciones, especialmente en las partes altas de las cordilleras, presentándose incongruencias al comparar los volúmenes de agua generados por precipitación y los correspondientes a la escurrimiento. En estos casos se debe recurrir a curvas de regionalización de precipitación, ETP y temperatura, variables que tienen una relación directa con la altitud (Relación elevación vs. evapotranspiración potencial. (Figura 24).

La información hidrológica y climatológica proveniente de la base de datos del IDEAM ha sido evaluada y complementada mediante análisis estadísticos de

consistencia con modelos como el ARIMA que permiten homogenizar las series de caudales diarios y mensuales.

Procesamiento de datos y control de calidad

La guía de protocolos y seguimiento del agua del IDEAM, que se referencia en este documento y que se puede consultar en la página de IDEAM, incluye procedimientos para análisis de calidad de datos y de información estadística hidrológica y meteorológica.

Muchas guías de la FAO y OMM contienen además de referencias relevantes, procedimientos prácticos para aplicar en el análisis de varios tipos de datos hidrológicos. En especial en la Guía de Prácticas Hidrológicas n.º 168 de la OMM (WMO, 2008), en el Capítulo 9. "Data processing and quality control" numerales 9.6, 9.7, 9.8, 9.9 donde se desarrollan temas sobre, procesos primarios específicos, procesos secundarios, validación y control de calidad y procedimientos de validación específicos, respectivamente⁵.

1.2.8. Modelamiento espacial de la oferta hídrica superficial

La estimación de la oferta hídrica superficial se realiza principalmente con información disponible a nivel nacional y regional, y está conformada por:

- Las **redes hidrometeorológicas**: la información de identificación de cada una de las estaciones que la conforman se encuentra consolidada en el catálogo de estaciones del IDEAM, con sus correspondientes coordenadas para su posterior georreferenciación. Esta es complementada por las redes propias de las autoridades ambientales. En la actualidad, nueve corporaciones⁶ señalan, en la encuesta realizada en el marco del convenio 174 de 2011, suscrito entre el MAVDT y el IDEAM, que disponen de una red regional que servirá de apoyo para el cálculo y validación de los parámetros de la oferta hídrica (IDEAM, 2011b, 2011c, 2011d).

Para las ERA es necesario contar con estaciones climatológicas y pluviométricas localizadas dentro o a poca distancia de la zona de trabajo, que se distribuyan, en lo posible, homogéneamente y con el mismo régimen climático, a fin de que quede cubierta toda el área.

Puntos virtuales: para cumplir con los requerimientos de cobertura de la red hidrometeorológica, dado que generalmente la densidad de la red de estaciones no es homogénea en el país, es necesario ubicar "puntos virtuales"

5 Este capítulo puede consultarse en: http://www.hydrology.nl/images/docs/hwrrp/WMO_Guide_168_Vol_I_en.pdf

6 CAR, CORPOCALDAS, CORNARE, CRQ, CORPOCHIVOR, CARDER, DAGMA, AMVA y SDA.

que suplan esta carencia, pero que al mismo tiempo permitan densificar la información de tal manera que toda la zona de estudio quede cubierta para la generación de los mapas. A los puntos virtuales se le estiman los valores mediante la interrelación de las variables climáticas de estaciones cercanas (ver más en "Componente oferta hídrica superficial").

- **Mediciones:** corresponden a las observaciones y mediciones de las variables hidrometeorológicas realizadas en las redes de estaciones, con las cuales se conforman las series de datos de precipitación, temperatura, evapotranspiración y caudal.

Los datos asociados a las estaciones deben corresponder a los valores para condiciones medias, secas y húmedas, anuales y mensuales para cada estación, con una serie histórica mayor de 20 años. En el ENA 2010, se consideran series de caudales diarios y mensuales con longitudes temporales de 34 años.

- **Modelo de elevación digital (DEM):** se debe trabajar con un corte del DEM para Colombia generado por la NASA (IDEAM, 2010a) que cubra toda la zona de interés, idealmente con resolución de 30 metros. El procesamiento del DEM va a permitir la obtención de mapas de pendientes, áreas de drenaje, dirección de drenaje, delineación de cauces y cuencas, cálculo de variables morfométricas y la modelación de los mapas de precipitación y evapotranspiración, entre otros.
- **Suelos:** esta información se puede obtener de los estudios detallados de suelos y zonificación de tierras y en una escala menor de los estudios departamentales, realizados por el IGAC.
- **Cobertura de la tierra:** resulta de la interpretación de fotografías aéreas e imágenes de satélite, o aplicando a las últimas una clasificación no supervisada donde las categorías obtenidas posteriormente se reclasifican para agrupar los usos, de acuerdo a los requerimientos. Para que exista homogeneidad entre AA se maneja leyenda Corin Land Cover.

Procedimiento metodológico

Los sistemas de información geográfica brindan herramientas que facilitan la espacialización de la oferta superficial y la integración con los demás componentes de las ERA para el cálculo del balance hídrico e indicadores.

El procedimiento para la obtención de los mapas de oferta hídrica superficial se subdivide inicialmente en dos caminos que se ejecutan de forma paralela (Figura 27): El primero se enfoca en la espacialización de las variables climáticas e hidrológicas para la totalidad de la zona de estudio y el segundo en la definición de las unidades espaciales para el análisis de la oferta superficial. Posteriormente, se unen de nuevo para el cálculo del balance hídrico e indicadores.

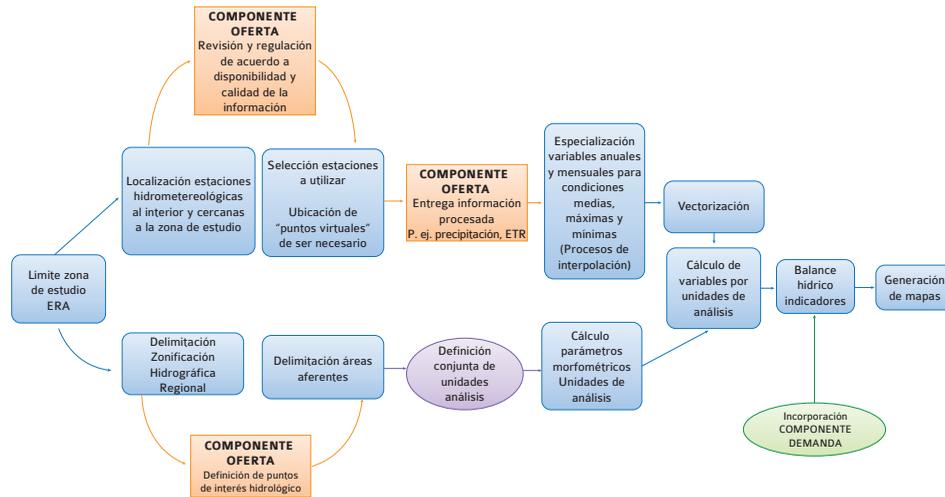


Figura 27. Procedimiento especialización oferta hídrica superficial

Zonificación Hidrográfica Regional: El proceso de generar la zonificación se realiza a partir del Modelo de Elevación Digital y la red hidrográfica en un software SIG con funciones de Análisis Espacial.

Los software SIG parten del DEM, que realiza un algoritmo basado en el escurrimiento del agua por el mayor gradiente. En este primer paso se genera la malla con valores de drenaje. El drenaje se determina a partir de números múltiples de dos: 2, 4, 6, 8, 16, 32, 64 y 128, en donde cada número representa un valor de dirección de flujo (Figura 28).

Este procedimiento es una alternativa para generar la red de drenaje, cuando no se dispone de la cartografía básica a una escala adecuada o para el total de la jurisdicción de las Autoridades Ambientales. Posteriormente, se genera una malla donde cada valor en la celda representa el número de celdas que drenan a ella que en los software licenciados como Arcgis se denomina "Flow accumulation".

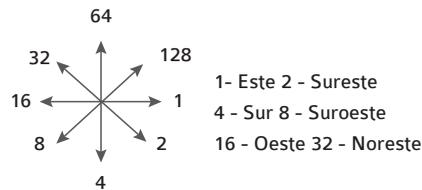


Figura 28. Códigos dirección del flujo

Fuente: ESRI.

Finalmente, se delimitan las superficies de captación; la subdivisión se realiza apoyándose en la red de drenaje al considerar los puntos de cierre. Para mayor

información sobre modelos y SIG enfocados a apoyar la gestión de los recursos Hídricos⁷.

Áreas aferentes: definidas como el área de las celdas que conforman un drenaje hasta un punto específico (punto de interés hidrológico), por ejemplo las estaciones ubicadas al interior de la zona de interés; se delimitan partiendo de las unidades de análisis zonificadas por las autoridades ambientales, las cuales no podrán exceder en sus límites y tamaño a las subzonas definidas en la zonificación hidrográfica nacional (IDEAM e IGAC, 2010). La capa resultante de áreas aferentes se encuentra en formato raster, por lo que es importante al vectorizar la realizar una edición de sus límites para evitar incongruencias con la red de drenaje, la cartografía base y la zonificación hidrográfica nacional.

Unidades espaciales de análisis: para la oferta superficial las unidades espaciales de análisis corresponden a las áreas aferentes agregadas y conciliadas con las unidades de interés para los componentes de la demanda y calidad. Posteriormente, se realiza el cálculo de los parámetros morfométricos para cada una de las unidades de análisis delimitadas.

Espacialización variables: para la elaboración de las capas de precipitación, evapotranspiración y otras variables que permitan evaluar la oferta hídrica superficial en las ERA, se requiere el uso de métodos de interpolación, tradicionales como Inverse Distance Weighted (IDW) y Spline, o los geoestadísticos, que fueron los usados en el ENA 2010 (IDEAM, 2010a) son:

Kriging: este método se basa en el principio de que, en aquellas variables que cambian de manera continua en el espacio, los puntos espacialmente próximos tienden a tener valores más similares que los que están más alejados (Hernández y Montaner, 2008). Los valores conocidos de la variable de interés son considerados según la distancia al lugar a interpolar, la redundancia entre los datos, la continuidad o variabilidad espacial, la anisotropía (dirección preferencial), entre otros.

Cokriging: por medio de este método de interpolación se puede incorporar una o varias variables secundarias en la estimación de un atributo principal cuando las primeras no son conocidas sobre todo el dominio de la estimación. Como lo señala Hurtado (2009), citado en el ENA (2010), el Cokriging permite que los datos secundarios participen directamente en la estimación de la variable principal. Este último método se aplica principalmente para la evapotranspiración, donde la variable secundaria es el DEM.

7 www.medellin.unal.edu.co/~hidrosig/; www.geology.wmich.edu/sultan/5350/Labs/ArcSWAT_Documentation.pdf;

Para modelar los mapas de escorrentía y rendimiento, se debe hallar el centroide del área aferente a cada estación, con el fin de que la interpolación sea más acertada, dado que se tienen valores puntuales de las estaciones de medición de caudal y se debe convertir en una lámina (mm) que cubra la totalidad del área de interés.

La selección del método de interpolación más apropiado, contempla criterios geoestadísticos⁸ y se realiza conjuntamente con el hidrólogo, puesto que es quien debe recomendar el método a usar para zonificar.

Balance hídrico e indicadores: cuando todas las variables se han espacializado se deben generar los valores medios de precipitación y ETP por cada área aferente. Con la elevación media, la longitud del cauce hasta cada estación, se determina la oferta hídrica superficial disponible. Como los resultados obtenidos se encuentran en formato raster, se debe realizar la vectorización para que sea posible el vínculo con el componente de la demanda.

Generación de mapas: al final del proceso se debe contar con las capas de:

- Red hidrometeorológica
- Precipitación anual y precipitación mensual (13)
- Evapotranspiración anual y mensual real (13)
- Escorrentía anual y mensual, para condiciones máxima, mínima y media (39)
- Rendimiento hídrico anual y mensual, máximos, mínimos y medios (39)

Para la salida final de cada una de estas se debe aplicar la leyenda de la Tabla 4 de la siguiente forma:

Tabla 4. Leyenda mapas oferta hídrica superficial

Color	Escorrentía promedio anual	RENDIMIENTO MEDIO ANUAL
	0 a 100	0 a 3
	100 a 200	3 a 6
	200 a 300	6 a 10
	300 a 400	10 a 15
	400 a 600	15 a 20
	600 a 800	20 a 30
	800 a 1000	30 a 40
	1000 a 1500	40 a 50
	1500 a 2000	50 a 70
	2000 a 2500	70 a 100
	2500 a 3000	100 a 150
	3000 a 4000	150 a 200
	4000 a 5000	Mayor de 200
	5000 a 6000	
	Mayor de 6000	

Por ejemplo, si los valores para el rendimiento de la ERA se encuentran entre 3 y 20, el mapa se debe encontrar en tonos de rojo a amarillo limón, es decir, los colores para los intervalos extremos serán estos y los rangos intermedios deben representarse en esta gama. El objetivo es mantener coherencia con el Estudio Nacional del Agua y que exista comparabilidad con los resultados de las otras autoridades ambientales. La escala de salida o para impresión será determinada por la corporación según el tamaño de su jurisdicción.





Capítulo 2

Evaluación de la dinámica y estado del agua subterránea

En esta parte se brindan las bases conceptuales y las orientaciones metodológicas para evaluar los sistemas acuíferos identificados en las áreas de jurisdicción de las autoridades ambientales.

2.1. Marco conceptual

En el subsuelo se encuentran formaciones geológicas consistentes en unidades roca-sedimento porosas (arenas, gravas, etc.) o fracturadas (calizas, areniscas, lavas, etc.), las cuales pueden contener agua en sus intersticios. Esta agua se denomina agua subterránea y los terrenos que la contienen y la pueden ceder se denominan acuíferos. Estos acuíferos pueden tener extensiones laterales de cientos a millones de metros constituyendo acuíferos locales en el primer caso y regionales en el segundo (ITGE, 1987).

Aquellas formaciones geológicas que conteniendo agua en su interior no la transmiten y por lo tanto no es posible su explotación, son denominadas *acuicludos* o *acuicierres*. El término *acuitardo* es usado para referenciar la existencia de numerosas formaciones geológicas que, conteniendo apreciables cantidades de agua, la transmiten muy lentamente por lo que tampoco son aptos para ser captados. Sin embargo, este tipo de formaciones permiten la recarga vertical de otros acuíferos. Se denomina *acuífugo* a aquellas formaciones que no permiten el ingreso del agua y tampoco la transmiten (Custodio y Llamas, 1996).

El agua subterránea tiene su origen en la lluvia, parte de la cual se infiltra directamente a través del suelo, o desde ríos y lagos, por grietas y poros de las unidades roca-sedimento hasta alcanzar un nivel impermeable que no la deja descender más (*Ibid.*). Allí se va acumulando con los años, llenando los acuíferos, y poco a poco circula a favor del gradiente hasta encontrar un nivel de salida a la superficie en puntos definidos que se convierten en manantiales o fuentes o, de forma difusa, en áreas tales como los lechos de los ríos, cuyo caudal es mantenido por las aguas subterráneas especialmente en los estiajes (Figura 29).

Bajo la superficie del terreno se diferencian dos zonas principalmente: la *zona no saturada* o zona vadosa y la *zona saturada*. El límite entre estas dos zonas

es el nivel de saturación o el nivel de agua, que se define técnicamente como la superficie cuyo potencial de presión es la presión atmosférica (Fitts, 2002) (Figura 30). La zona no saturada comprende desde la superficie del suelo hasta el nivel saturado o superficie de agua; consta de poros ocupados parcialmente por agua y parcialmente por aire. En la zona saturada el agua subterránea llena todos los poros, por lo tanto, la porosidad provee una medida directa del contenido de agua por unidad de volumen. Una porción del agua puede ser removida del subsuelo por drenaje o por bombeo con un pozo, sin embargo, las fuerzas de tensión molecular y superficial mantienen el resto de agua en su lugar (Todd y Mays, 2005).

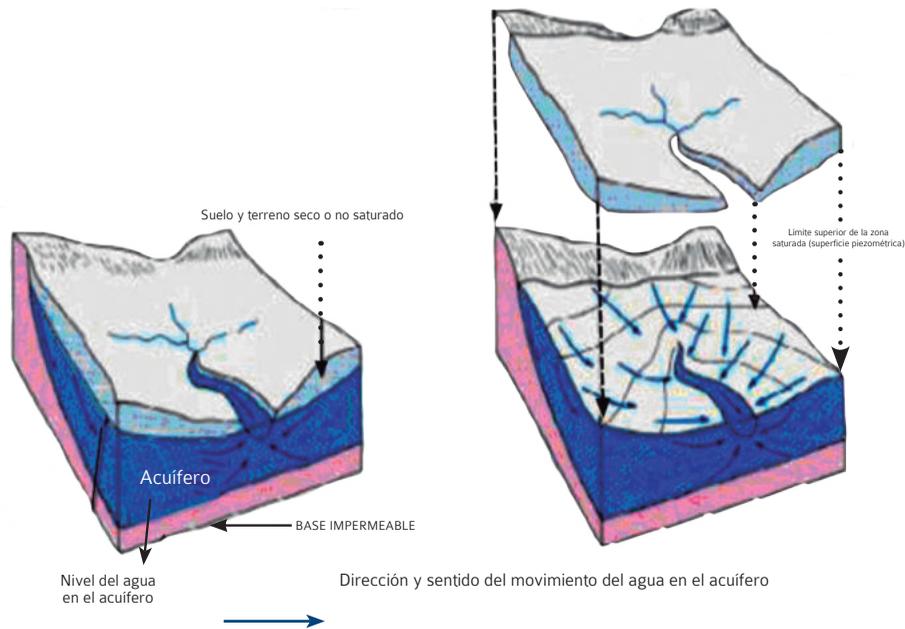


Figura 29. Esquema de circulación permanente de aguas subterráneas

Fuente: ITGE, 1987.

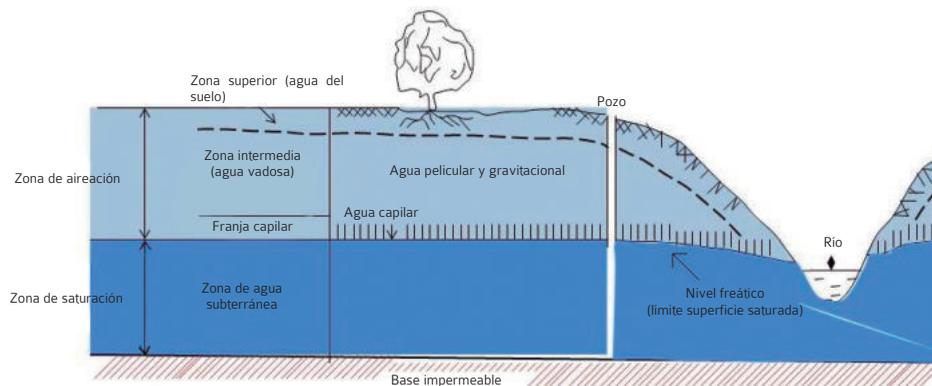


Figura 30. Distribución de agua en el subsuelo

Fuente: ITGE, 1987.

Cuando se hace una perforación que atraviesa las formaciones acuíferas, el agua contenida en los poros o grietas pasa a la perforación o pozo llenándolo hasta un cierto nivel llamado nivel del *agua subterránea* o *nivel piezométrico* (ITGE, 1987) (Figura 31). El *nivel piezométrico* es definido como la altura de la columna de agua que equilibra la presión del agua del acuífero en un punto determinado, por lo tanto, está referido a una altitud determinada (López-Geta *et ál.*, 2009).

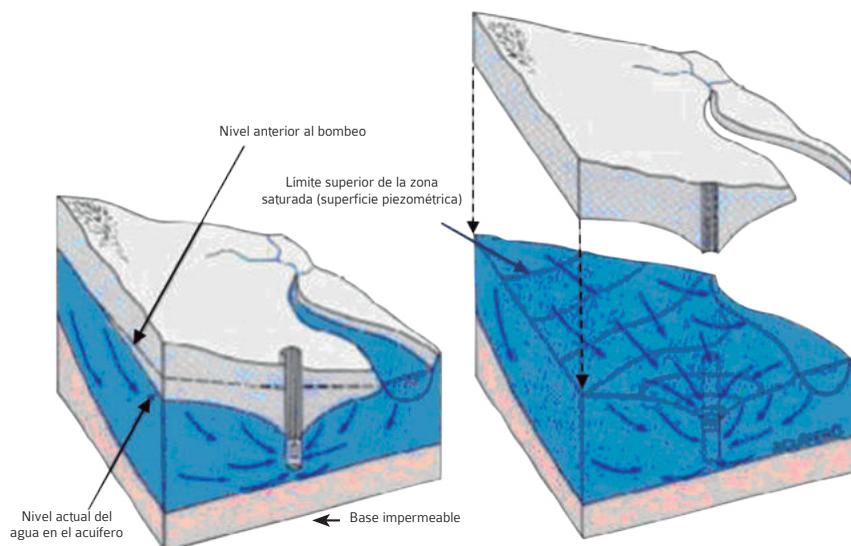


Figura 31. Modificación del flujo de aguas subterráneas por efecto de captaciones

Fuente: ITGE, 1987.

Los acuíferos, según la estructura geológica de los materiales que los forman y las condiciones hidráulicas del agua que contienen, pueden ser (ITGE, 1987) (Figura 32):

- **Acuíferos libres:** también llamados no confinados o freáticos, son aquellos en los que el límite superior de la masa de agua forma una superficie que está en contacto con el aire de la zona no saturada. Al perforar pozos, el agua en ellos se sitúa al ras de la zona saturada, marcando el nivel freático, que en este caso es también el nivel piezométrico. Desde un punto de vista hidráulico se dice que la presión (en la superficie del agua en el pozo o en las fisuras) es exactamente la atmosférica (*Ibíd.*).

Cuando el agua que se infiltra a través de la zona no saturada encuentra una formación poco permeable en forma de lente, embebida en materiales más permeables, se acumula en la parte superior de la lente dando origen a un *acuífero colgado*. El agua se mueve lateralmente y puede dar origen a manantiales.

- **Acuíferos confinados:** también llamados artesianos, cautivos o a presión, la roca permeable queda encajada por encima y por debajo en terrenos impermeables; todo el espesor del acuífero está saturado de agua y la presión de agua en los poros o fisuras es mayor que la atmosférica. Cuando se perfora un pozo en ellos, es decir, cuando el acuífero se pone en contacto con la atmósfera, el agua sube por la perforación o pozo, quedando el nivel del agua por encima del punto en que el pozo alcanzó al acuífero. El nivel a que queda el agua en un sondeo en tales acuíferos se denomina nivel piezométrico del acuífero en ese punto (*Ibíd.*). En ocasiones (menos numerosas de lo que parece) el nivel del agua supera el de la superficie y el agua desborda por la boca y se dice entonces que los pozos son surgentes o *saltantes*.
- **Acuíferos semiconfinados:** también denominados semicautivos, pueden considerarse un caso particular de los acuíferos confinados, en los que el muro (parte inferior) y/o el techo (parte superior) que los encierra no es totalmente impermeable sino un material que permite la filtración vertical del agua, muy lenta, que alimenta el acuífero principal (Custodio y Llamas, 1996).

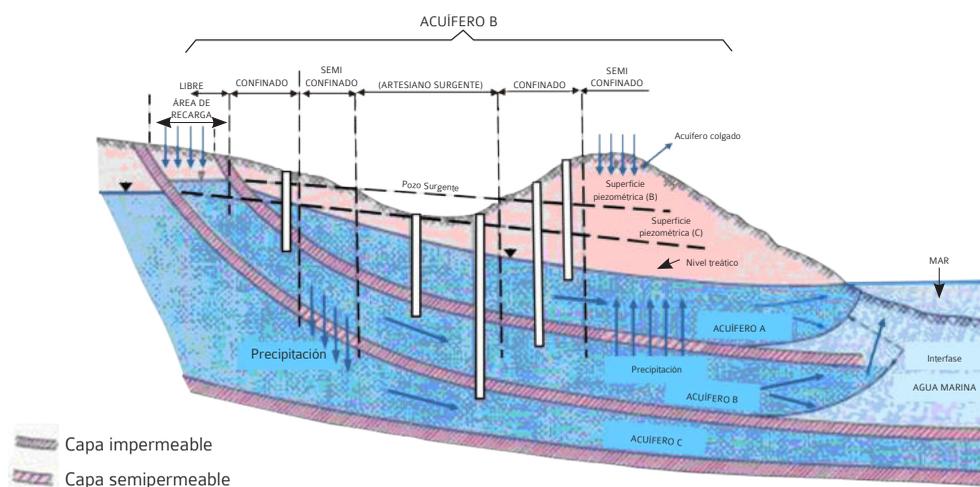


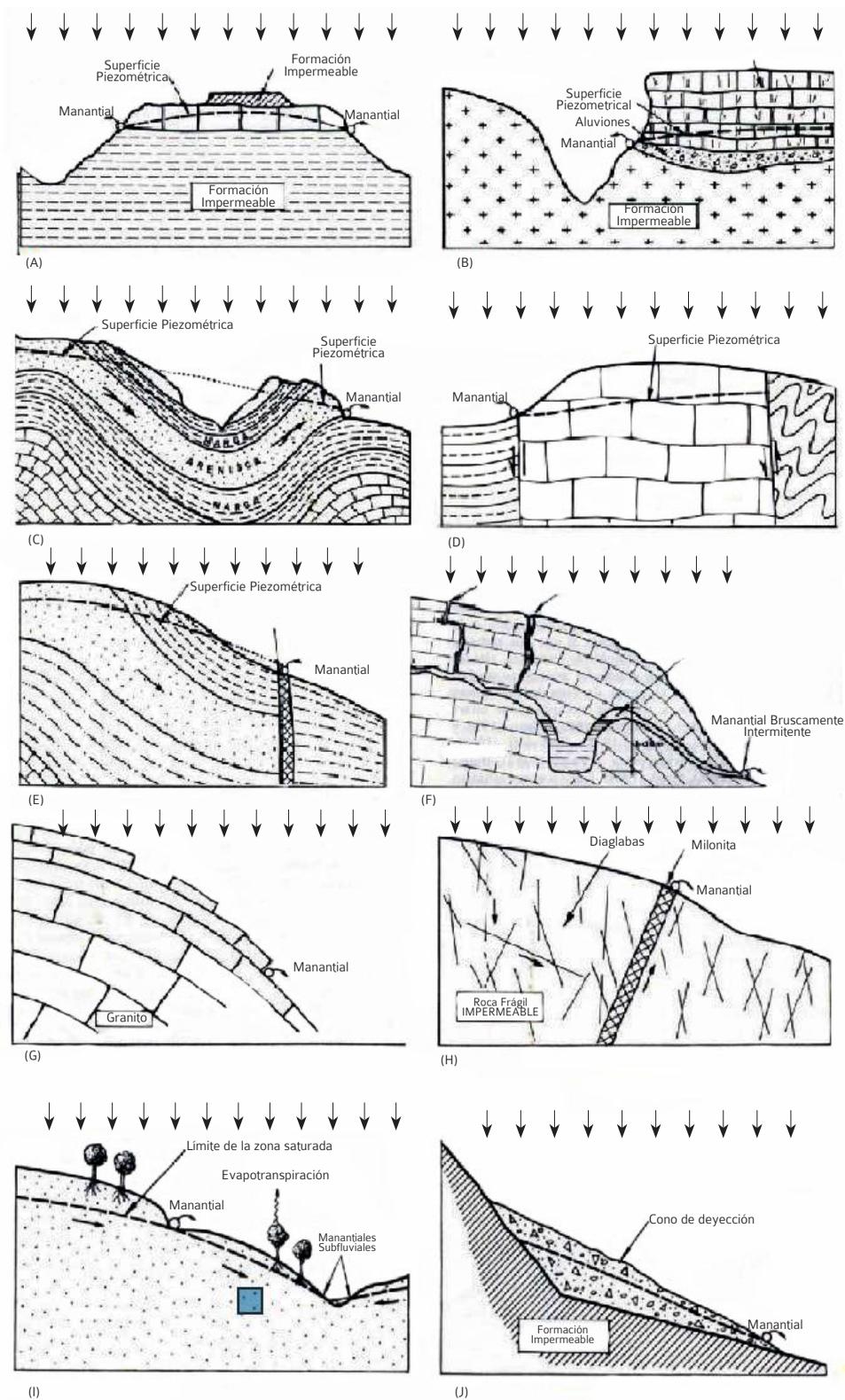
Figura 32. Acuíferos libres, confinados y semiconfinados

Fuente: Bear, 1982. En: ITGE, 1987.

Los manantiales pueden definirse como un punto o zona de la superficie del terreno en la que, de modo natural, fluye a la superficie una cantidad apreciable de agua, procedente de un acuífero o embalse subterráneo; son, a modo de aliviaderos o desagües por los que sale la infiltración o recarga que reciben los embalses subterráneos (Custodio y Llamas, 1996).

Los factores que caracterizan el funcionamiento de un manantial corresponden a los parámetros geométricos e hidrológicos del embalse subterráneo y las condiciones de recarga. Es así como existen diferentes tipos de manantiales con características específicas (Figura 33) (*Ibíd.*).

Los manantiales tipo (A) drenan un acuífero tabular recargado por la lluvia. Los tipo (B) son aquellos que drenan una formación basáltica poco permeable a través de los aluviones de un valle fosilizado por la colada volcánica. Los (C) drenan de un acuífero confinado. Los (D) son aquellos que drenan de un embalse subterráneo limitado lateralmente por dos fallas. Los tipo (E) son los que drenan un acuífero confinado a través de una zona milonitizada. Los (F) corresponden a un esquema del sistema hidráulico que origina los cambios bruscos de caudal de algunos manantiales intermitentes de zonas kársticas. Los (G) corresponden a diaclasas en descompresión del granito que suelen dar lugar a manantiales pequeños y efímeros. Los (H) son manantiales originados por la descarga de las aguas de las diaclasas que drenan una zona fracturada. Los manantiales (I) corresponden a un embalse subterráneo en un terreno homogéneo que está fundamentalmente controlado por las relaciones entre el límite de la zona saturada y la superficie del terreno. Los manantiales tipo (J) drenan de un cono de deyección cuya base está formada por terrenos impermeables (*Ibíd.*).



Para ser verdaderamente acuífera, la roca, además de contener agua, necesita poder cederla, cualidad que se denomina *permeabilidad o conductividad hidráulica*. Hay arcillas que pueden absorber cantidades notables de agua, pero bajo condiciones naturales no la ceden, sino que la retienen en su masa (ITGE, 1987). Esas rocas o sedimentos no son acuíferas. La permeabilidad, en un sentido amplio, mide tanto la posibilidad de poder extraer, drenar o bombear agua como la posibilidad de introducir, infiltrar o recibir agua en un acuífero. Representada por la letra K, es definida como la relación entre el caudal por unidad de área y el gradiente hidráulico, tal como se indica en la Ecuación 10 (Custodio y Llamas, 1996):

$$K = \frac{Q/A}{(h_A - h_B)/L}$$

Ecuación 10

Donde:

- Q: caudal de agua,
- K: conductividad hidráulica,
- A: sección que atraviesa el flujo,
- $h_A - h_B$: diferencia de niveles de agua entre la entrada y la salida de flujo,
- L: longitud recorrida por el fluido.

El signo negativo indica que el flujo se desarrolla en la dirección en la que decrece la altura de agua (*Ibíd.*). El cociente entre la diferencia de alturas entre las secciones de entrada y salida y la distancia entre ellas se llama gradiente hidráulico *i* (Ecuación 11), es decir:

$$i = \frac{h_A - h_B}{L}$$

Ecuación 11

En la Tabla 5 se indican valores de permeabilidad de acuerdo a las posibilidades del acuífero.

Tabla 5. Valores de permeabilidad

Valores de permeabilidad (K)		
(Adaptado de Villanueva e Iglesias, 1984)		
K (m/día)	Calificación estimativa	Posibilidades del acuífero
$K < 10^{-2}$	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica
$10^{-2} < K < 1$	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica
$1 < K < 10$	Media	Pozos entre 10 y 50 l/s con 10 m de depresión teórica
$10 < K < 100$	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión teórica
$100 < K$	Muy alta	Pozos con más de 100 l/s con 10 m de depresión teórica

Fuente: ITGE, 1987.

La propiedad de una roca que la hace poder contener agua se define técnicamente como la *porosidad* o porcentaje de intersticios existentes en los sólidos discontinuos en relación con el volumen total de la unidad roca-sedimento (ITGE, 1987). Los

intersticios denominados poros, grietas, huecos o espacios entre los materiales del suelo son ocupados por el agua subterránea. Así, la porosidad de una roca viene expresada por la relación entre el volumen de su parte vacía u ocupada por aire y/o agua y su volumen total (Custodio y Llamas, 2001). Acorde con la naturaleza de la roca, la porosidad puede ser clasificada tal como se indica en la Tabla 6.

Un término importante derivado de la porosidad es la *porosidad efectiva*, la cual se refiere a la cantidad de espacio de poros interconectados disponibles para el flujo del fluido y se expresa como una relación de intersticios interconectados con el volumen total. Para medios porosos no consolidados y muchas rocas consolidadas, las dos porosidades son idénticas (*Ibíd*). Algunos valores de porosidad efectiva para diferentes materiales de la corteza terrestre se presentan en la Tabla 6. La diferencia entre *porosidad total* y la *eficaz* es la retención específica de agua (volumen o parte del agua que queda retenida en los poros y fisuras del terreno) –equivalente a la capacidad de campo de dicho medio–, siendo ambos valores muy variables en función, sobre todo, del tamaño medio de los granos minerales. La porosidad efectiva no representa más que una porción a menudo pequeña de la porosidad total. Así, las reservas útiles de un material acuífero están condicionadas por la porosidad eficaz (Custodio y Llamas, 1996).

Tabla 6. Valores de porosidad efectiva para diferentes materiales de la corteza terrestre

Material	Porosidad efectiva o rendimiento específico (%)				
	Walton (1970)	Johnson (1967)	Rodríguez (1984)	USGS (1987)	Sanders (1998)
Arcilla	1-10	0-5	0-3	2	
Arcilla arenosa		3-12			
Arena	10-30			22	
Arena fina		10-28	18-22		10-28
Arena media		15-32	26-28		
Arena gruesa		20-35	27-30		22-35
Arena y grava	15-25	20-35	17-21		
Arenisca	5-15				0,5-10
Arenisca semiconsolidada				6	
Grava	15-30			19	13-26
Grava fina		21-35	22-24		
Grava media		13-26	16-24		
Grava gruesa		12-28	17-22		
Caliza	0,5-5			18	
Calizas, dolomitas no carstificadas					0,5-10
Calizas, dolomitas carstificadas					5-40
Lutita	0,5-5		0-3		0,5-5
Limo		3-19			3-19
Granito				0,09	
Basalto				8	
Rocas ígneas					0,005-0,01

En general, permeabilidad y porosidad son parámetros que definen las características hidráulicas de un acuífero.

La *transmisividad* (Tabla 7), que es el producto de la permeabilidad del acuífero por su espesor saturado, se define también como el caudal de agua que proporciona una sección de ancho unidad de frente acuífero sometido a un gradiente del 100% (ITGE, 1987). Sus dimensiones son las de una velocidad por una longitud, expresándose en m²/día o cm²/sg (Custodio y Llamas, 1996).

Tabla 7. Valores de transmisividad para diferentes tipos de materiales

Clasificación de terrenos por su transmisividad (m ² /día)					
(Adaptado de Custodio y Llamas, 1983)					
T	1	10	10 ²	10 ³	
Calificación	Impermeables	Poco permeable	Algo permeable	Permeable	Muy permeable
Calificación del acuífero	Sin acuífero	Acuífero muy pobre	Acuífero pobre	Acuífero de regular a bueno	Acuífero excelente
Tipo de materiales			Arena fina	Arena limpia	
	Arcilla compacta	Limo arenoso	Arena limosa	Grava y arena	Grava limpia
	Pizarra	Limo	Caliza pozo fracturada	Arena fina	Dolomias, calizas
	Granito	Arcilla limosa	Basaltos	Caliza fracturada	Muy fracturadas

Fuente: ITGE, 1987.

El conjunto de cualidades que condicionan el volumen de agua producida se cuantifica mediante el *coeficiente de almacenamiento*, que es la cantidad de agua cedida por un prisma de acuífero de un metro cuadrado de sección y la altura del acuífero, cuando el nivel piezométrico baja un metro (ITGE, 1987). El coeficiente representado por la letra S no tiene dimensiones y corresponde a la siguiente ecuación (Custodio y Llamas, 1996):

$$S = \text{Volumen de agua} / \text{Área unitaria} \times \text{Cambio unitario de la altura de agua}$$

Ecuación 12

Algunos valores típicos de acuerdo al material permeable están indicados en la Tabla 8.

Tabla 8. Valores de coeficiente de almacenamiento

Valores del coeficiente de almacenamiento (S)		
(Villanueva e Iglesias, 1984)		
Tipo de material permeable	Forma de funcionamiento del acuífero	Valores de S (medio)
Kárstico:		
Calizas y dolomitas jurásicas	Libre	2×10^{-2}
	Semiconfinado	5×10^{-4}
	Confinado	5×10^{-5}
Calizas y dolomitas cretácicas y terciarias	Libre	$2 \times 10^{-2} - 6 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	$10^{-3} - 5 \times 10^{-4}$
	Confinado	$10^{-4} - 5 \times 10^{-5}$
Poroso integranular:		
Gravas y arenas	Libre	$5 \times 10^{-2} - 15 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	10^{-3}
	Confinado	10^{-4}
Kársticos y porosos:		
Calcarenitas marinas terciarias	Libre	$15 \times 10^{-2} - 18 \times 10^{-2}$

Fuente: ITGE, 1987.

Por otra parte, el *almacenamiento específico* S_s se define como el volumen de agua que un acuífero absorbe o expulsa de su almacenamiento por unidad de área por unidad de espesor de acuífero por unidad de cambio en la altura piezométrica (Custodio y Llamas, 1996), es decir:

$$S_s = \text{Volumen de agua} / \text{Área unitaria} \times \text{Espesor unitario} \times \text{Cambio unitario de la altura}$$

Ecuación 13

Luego $S = b \times S_s$

Donde b es el espesor saturado del acuífero.

En los acuíferos libres, el coeficiente de almacenamiento es igual a la porosidad eficaz y varía entre 0.05 a 0.30 (*Ibíd.*).

Para el caso de acuíferos confinados, el volumen de agua contenido en un elemento de volumen geométrico fijo varía al variar la presión del mismo. Ello es debido a la compresión o expansión del agua. Además, el acuífero se deforma al variar la presión del agua, variando su porosidad. Es decir, el coeficiente de almacenamiento que generalmente varía en este tipo de acuíferos en el orden de 10^{-3} y 10^{-5} y es calculado (*Ibíd.*):

$$S = \gamma b (\phi\beta + \sigma)$$

Ecuación 14

Donde:

γ : es el peso específico del agua

b: es el espesor del acuífero

ϕ : es la porosidad del acuífero

β : es el coeficiente de compresibilidad dinámica del agua

σ : es el coeficiente de compresibilidad dinámica vertical del suelo

Para que el agua se mueva en un acuífero, es necesario que de un punto a otro de este exista una diferencia de presión o de altura. En el laboratorio se emplea algún tipo de manómetro para medir esa diferencia de presión. En el campo, sobre el terreno, se mide como diferencia de altura de agua en dos piezómetros, nivelados topográficamente. Un piezómetro no es más que un pozo o sondeo abierto en su parte superior a la atmósfera y, en su parte inferior, al acuífero a medir, controlando así el nivel de agua en los acuíferos. Con los datos obtenidos se establecen los mapas piezométricos que indican las zonas del acuífero con mayor o menor altura de presión (nivel referido a cota absoluta). Basándose en mapas piezométricos puede determinarse la dirección del movimiento del agua subterránea y su pendiente (ITGE, 1987).

El estudio microscópico del comportamiento de un medio poroso es extraordinariamente complejo dada la forma complicada de los poros por los que debe circular el fluido. Afortunadamente pueden establecerse leyes de carácter macroscópico que tratan el medio como un continuo con unas propiedades medias bien definidas. La Ley de Darcy establece la relación macroscópica fundamental y a partir de ella puede llegarse a expresar el flujo en forma de ecuaciones; también establece una proporcionalidad directa entre la velocidad de flujo de un fluido en un medio poroso (v) en régimen laminar y el gradiente hidráulico (i), la cual es una propiedad macroscópica del medio (Custodio y Llamas, 1996).

$$i = -v / K$$

Ecuación 15

$$\text{Siendo } v = -k * i = -k*(dh/ds)$$

Ecuación 16

Donde:

v = velocidad de flujo

i = gradiente hidráulico

k = permeabilidad o conductividad hidráulica.

La Ley de Darcy es válida en un medio saturado, continuo, homogéneo (sus propiedades son constantes en cualquier lugar del mismo) e isótropo (cuando sus propiedades principalmente la permeabilidad, no dependen de la orientación del medio) (*Ibíd.*).

Bajo el nivel freático, en la zona no saturada predomina el flujo horizontal dirigido hacia áreas de descarga. Sin embargo, es importante comprender que significativos componentes verticales de flujo pueden desarrollarse localmente, descendentes en áreas de recarga y ascendentes en áreas de descarga (Foster y Caminero, 1989). Existen diferencias significativas en los regímenes de flujo de aguas subterráneas y el tiempo de residencia en diferentes condiciones climáticas (Figura 34). Por lo general, décadas, siglos o miles de años pueden transcurrir en el pasaje de agua a través del sistema subterráneo del ciclo hidrológico, ya que las tasas del flujo normalmente no exceden 10 m/día y pueden ser tan bajas como 1 m/año (*Ibíd.*).

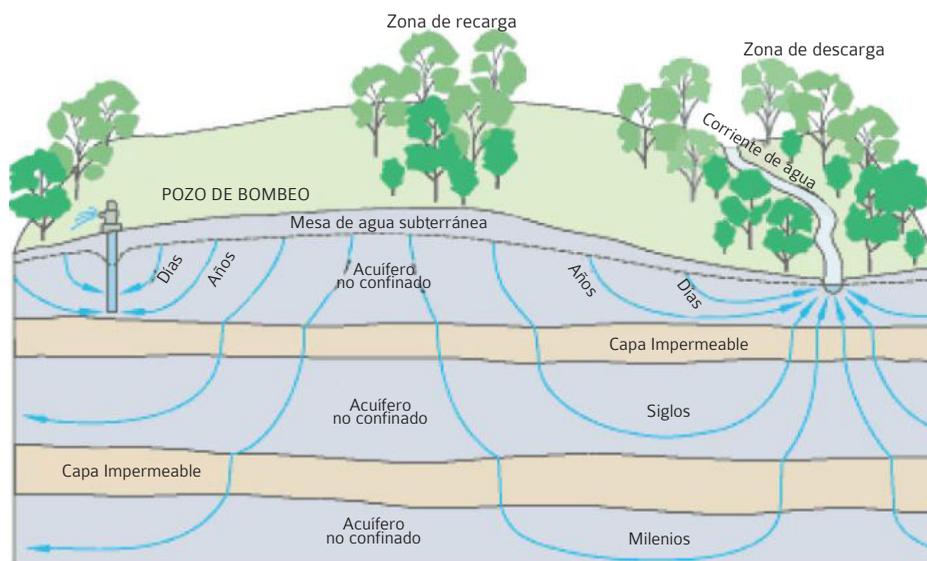


Figura 34. Sección hipotética para ilustrar típicos regímenes de flujo de agua subterránea y tiempos de residencia subterránea bajo condiciones húmedas

Fuente: (Winter et al., 1998)

2.1.1. Reservas y recargas de aguas subterráneas

“La evaluación de la cantidad de agua subterránea disponible para explotación en un acuífero es uno de los problemas que mayor polémica suscita a la hora de operacionalizar instrumentos que legitimen el dominio jurídico establecido para la gestión del recurso hídrico” (IDEAM, 2010a). “Sin embargo, es claro que esta oferta está relacionada con los recursos y reservas, en el enfoque de la escuela europea, y con el caudal seguro (*safeyield*), cuando se enfoca desde la escuela norteamericana⁹. En este documento, se busca una aproximación conceptual y una forma práctica de cuantificar esta cantidad de agua disponible para efectos del cálculo de reservas de agua subterránea en el país” (IDEAM, 2010a). En este documento, se busca una aproximación conceptual para identificar y cuantificar la reserva y la recarga de agua subterránea en los sistemas acuíferos.

“La capacidad de un acuífero es una función de su volumen útil y, por lo tanto, su estimación atiende los determinantes que condicionan ese volumen. Así pues, es fácil entender que puede estimarse un volumen de almacenamiento estático, que tiene en cuenta las características intrínsecas del embalse subterráneo, y un volumen dinámico, que considera la distribución espacio-temporal de la alimentación o recarga” (IDEAM, 2010a). En el primer caso, la reserva es definida como la cantidad de agua almacenada en el acuífero que puede drenar por la acción de la gravedad, es decir, la parte del volumen de saturación que no queda adherida de una u otra forma a las partículas en el proceso de extracción de agua (Pérez,

9 Una amplia disertación sobre el tema se encuentra en Pérez, Diosdado, 1995.

1995). La reserva se expresa en unidades de volumen y equivalen al producto de la superficie de un acuífero por su espesor saturado de agua y por su coeficiente de almacenamiento, según el tipo de acuífero definido anteriormente (ITGE, 1987).

Las fluctuaciones del nivel freático en acuíferos libres representan, por lo tanto, variaciones de las reservas. Es posible distinguir en un año hidrológico los siguientes escenarios (Pérez, 1995):

- Reservas mínimas, asociadas con el caudal mínimo de escorrentía subterránea que depende de las condiciones de flujo del agua subterránea. Corresponden a la superficie freática mínima o de estiaje.
- Reserva máxima, asociada con el caudal máximo de escorrentía subterránea. Corresponde a la superficie freática máxima.

Estos conceptos permiten definir una *variación de la reserva*, que es la diferencia entre las reservas mínimas y las máximas para el año hidrológico en cuestión. De esta reflexión surgen nuevas definiciones (Pérez, 1995 en IDEAM 2010a):

- Las *reservas permanentes*, que están relacionadas con la reserva mínima media.
- La *reserva total*, que corresponde a la reserva máxima media.
- La *variación de la reserva*, que se define como la diferencia entre las dos primeras. A esta variación de la reserva (Castany, 1967) se la denominó *reserva reguladora* (Pérez, 1995).

Las ERA deben dar cuenta de las reservas permanentes de los sistemas acuíferos y de la *oferta renovable de aguas subterráneas* que corresponde a la *variación anual de la reserva*. En otras palabras, esta *oferta renovable* corresponde a la recarga media anual del sistema acuífero.

En el segundo caso, la recarga se refiere a la manera como los acuíferos se recargan o llenan de agua de forma natural por infiltración del agua de lluvia que cae sobre ellos, de los ríos o lagos que los atraviesan o limitan, y también puede ser de manera artificial producto del excedente de agua empleada en regar cultivos asentados sobre ellos (excedente respecto al agua consumida por el propio cultivo y por la evaporación), fugas de redes de abastecimiento o por infiltraciones de embalses y depósitos (Lerner, 1990, en Vélez, 2004). Este volumen de agua que se llama también aportación, recarga o entrada al acuífero es variable a lo largo del tiempo, mayor en unas épocas, menor o inexistente en otras y, para valorarlo, si no se tienen mediciones de detalle se suelen establecer valores medios en períodos dilatados, por ejemplo, a lo largo de series de años.

Las fuentes de recarga que pueden ser naturales o artificiales, también pueden ser clasificadas como recarga directa o recarga difusa (proveniente del agua lluvia), recarga concentrada o indirecta (producto de cauces permanentes, estacionales y efímeros), flujos laterales (procedentes de otros acuíferos), retorno de riegos,

excesos de riegos o las pérdidas en los canales de distribución y recarga urbana (producto de fugas de redes de abastecimiento y redes de alcantarillado) (Lerner, 1990, en Vélez, 2004).

Dependiendo del ambiente geológico y de las conexiones hidráulicas, el agua superficial puede estar en conexión con el agua subterránea. El estudio de estas conexiones es de vital importancia; primero para estimar la recarga y las dinámicas en épocas de estiaje y en épocas de alta pluviosidad. La Figura 35 ilustra la relación posible o conexión hidráulica entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas. En este sentido, el tipo de conexión hidráulica vendrá dado principalmente por dos factores: a) la situación de las formaciones geológicas permeables en relación con el cauce del río; y b) la situación relativa de los niveles del río y de los niveles piezométricos en la zona del acuífero contigua al río (Custodio y Llamas, 2001). Dependiendo de esto, las aguas de un manantial van a parar a un río después de aflorar en el terreno (Figura 35a), un río puede recibir caudal de agua subterránea (Figura 35b), un acuífero es recargado por un río (Figura 35c), en épocas de aguas altas el acuífero aporta al río (Figura 35d) y, finalmente, el río puede ser beneficiado por una recarga de un acuífero confinado profundo (Figuras 35e y 35f).

El conocimiento de las áreas de recarga o descarga en una cuenca o en un sistema es necesario para realizar un manejo sostenible de los sistemas acuífero (Scanlon *et ál.*, 2002). Adicionalmente, permite determinar zonas de manejo especial y zonas vulnerables a la contaminación.

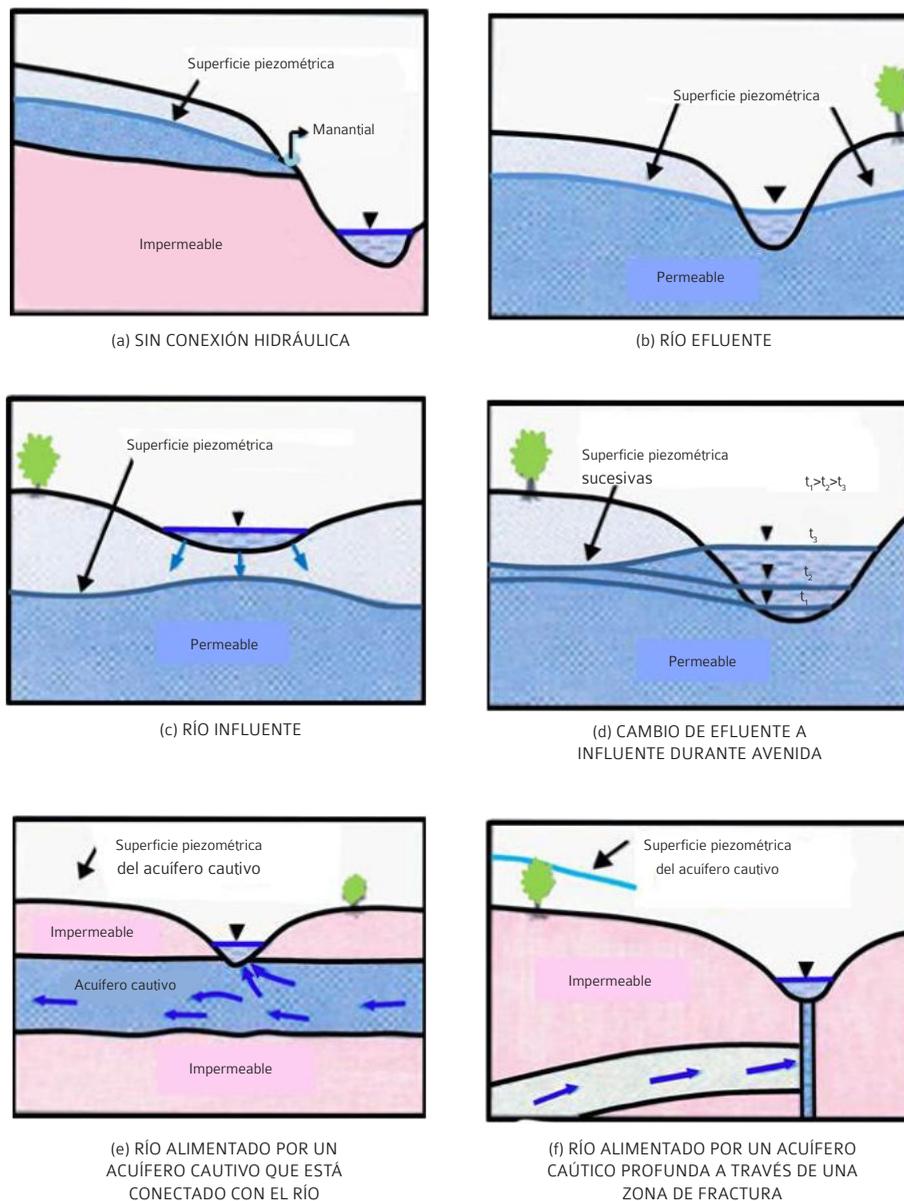


Figura 35. Relaciones posibles entre río-acuífero

Fuente: Custodio y Llamas, 1976. ITGE, 1987.

2.1.2. Modelo Hidrogeológico Conceptual

El Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC) integra la información geológica, hidrológica, hidrodinámica, hidráulica, hidroquímica e isotópica para ilustrar los procesos y flujos que ocurren en las dimensiones espaciales de su dominio (Figura 36).

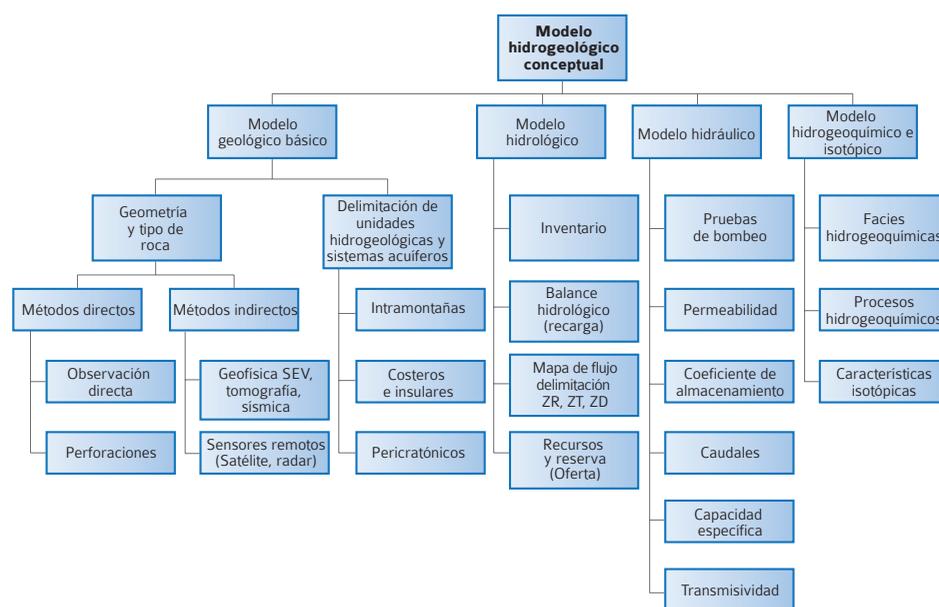


Figura 36. Modelo Hidrogeológico Conceptual

- **La evaluación geológica-geofísica**, a la escala apropiada para fines hidrogeológicos, debe componerse combinando métodos directos (que comprenden observaciones de afloramientos, levantamiento de columnas estratigráficas, correlaciones estratigráficas, elaboración de secciones geológico-geofísicas, análisis de registros litológicos de perforaciones exploratorias) e indirectos (procesamiento de imágenes de satélite, radar, fotografías aéreas e interpretación geofísica de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) y registros sísmicos, tomográficas, magnetométricas y los correspondientes a perfilaje o registro geofísico de pozos).
- **La evaluación hidrológica** permite reconocer la distribución espacio-temporal de la recarga, dinámica de flujo (zonas de recarga, tránsito y descarga representadas en mapas de isopiezas a construidos a partir de pozos con nivelación topográfica), balance hídrico y relaciones hidráulicas con subsistemas de agua superficial. El modelo hidrológico se construye a partir de información hidroclimática, uso de trazadores e inventarios de puntos de agua (pozos, aljibes y manantiales). Los inventarios se realizan mediante campañas que permiten recolectar información de usos y usuarios, tendencias de la demanda, estado sanitario de captaciones, parámetros de diseño de las captaciones, características hidráulicas de pozos, condiciones y cuantificación de aprovechamientos, parámetros de calidad físico-química de las aguas captadas y otras variables que contempla el FUNIAS y que deben ser incorporadas al Sistema de Información de Recurso Hídrico Subterráneo Regional para generar productos de valor agregado representados en estadísticas, espacialización de variables e indicadores de estado. La autoridad ambiental debe definir cada cuánto se deben actualizar estos inventarios atendiendo las condiciones regionales de uso y densidad de captaciones. Este

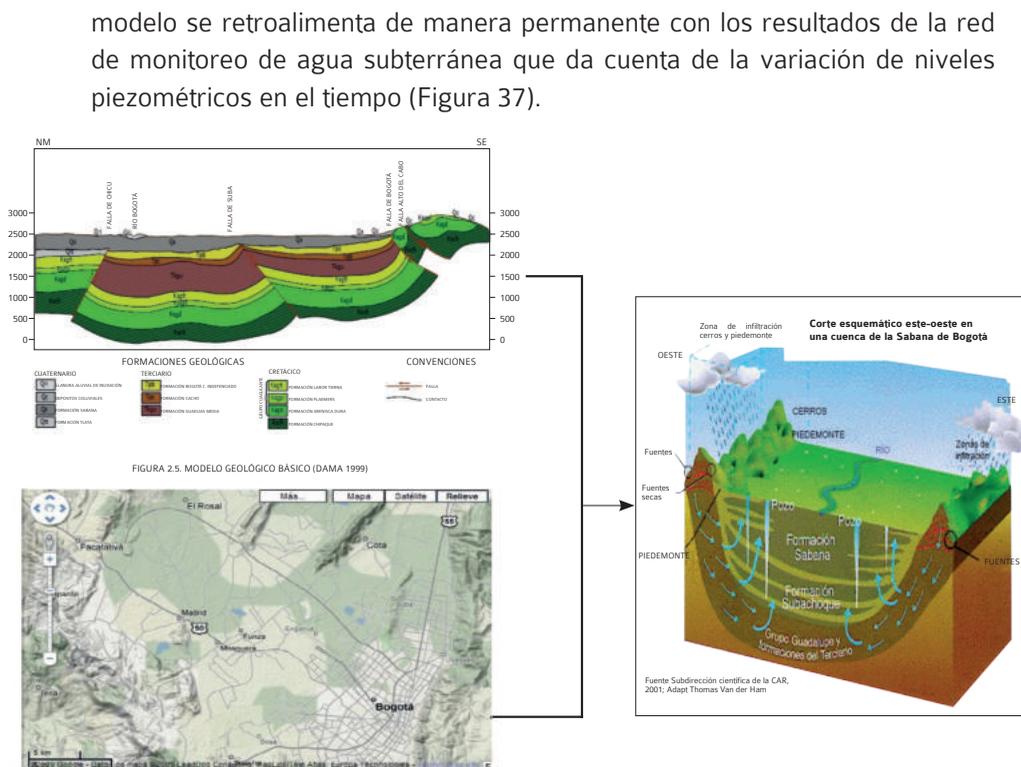


Figura 37. Construcción de un modelo hidrogeológico conceptual de la Sabana de Bogotá a partir de información geográfica, geológica, hidrodinámica e hidrológica

- **La evaluación hidrogeoquímica** e isotópica complementa y es parte estructural del MHC. Permite reconocer facies hidrogeoquímicas, separar y reconocer sistemas de flujos, delimitar zonas de recarga, validar sistemas de flujo, identificar interacción entre uno o más acuíferos y relaciones entre agua superficial-agua subterránea, precisar edad y origen de las aguas subterráneas y reconocer afectaciones por actividad antrópica. Se construye a partir del seguimiento en redes de monitoreo de hidrogeoquímica e isotopía y se complementa con información proveniente de inventarios de puntos de agua.
- **El modelo hidráulico e hidrodinámico** permite reconocer tipos de acuíferos (libre, confinado, semiconfinado), especializar variables hidráulicas (permeabilidad, capacidad específica, caudales de explotación, rendimientos o productividad), reconocer superposición y extensión de conos de abatimiento, etc. Parte de la interpretación y extrapolación de resultados de pruebas de bombeo (a caudal constante, escalonadas, slug test, etc.) que dan información de captaciones y del acuífero.

El MHC es dinámico en la medida en que se actualice la información de las variables hidrogeológicas de cantidad y calidad y las estadísticas de extracción y recarga (natural e inducida) a partir de un monitoreo permanente y sistemático que dé cuenta de la dinámica e interrelaciones con el medio físico. En este sentido, debe

aclararse que no hay coincidencia entre los límites de las divisorias de unidades hidrográficas y las unidades de análisis hidrogeológicas por lo cual es imperativo desarrollar estrategias y técnicas para involucrar el subsistema hídrico subterráneo en la GIRH (Figura 38).

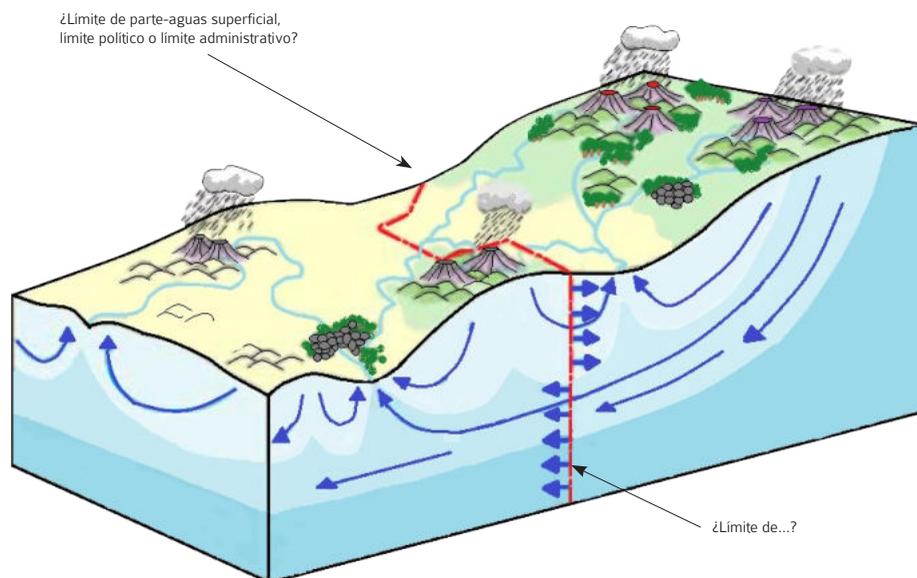


Figura 38. Divergencia de límites hidrográficos e hidrogeológicos

Fuente: Carrillo y otros, 2007.

Por otro lado, es importante entender que los sistemas hidrogeológicos determinan flujos de carácter regional, intermedio y local que deben ser considerados para entender dinámicas ecosistémicas al formular medidas de protección, manejo y adaptación (Figura 39).

En este punto es necesario aclarar que el estudio del comportamiento y la dinámica de las aguas subterráneas no concluyen con el Modelo Hidrogeológico Conceptual. De hecho, el MHC constituye un insumo para el empleo de herramientas numéricas que permitan validar el MHC y comprender a mayor detalle las aguas subterráneas. En cualquiera de los modelos (conceptual o numérico), se deben disponer de una serie de datos tomados sistemáticamente y validados. Para esto, es necesario realizar un monitoreo con unos objetivos y una frecuencia definida, que incluya la medición directa y remota de variables de cantidad y calidad, inventario de causas potenciales de cambio y análisis y predicción de la naturaleza de futuros cambios (Foster, 1989).

En este sentido, un modelo científico es una herramienta que reproduce el funcionamiento de un sistema natural, y cuyo objetivo es el estudio y el análisis del mismo bajo diferentes condiciones. Permite asimismo obtener una visión de conjunto de los procesos naturales que en él pueden actuar, y analizar la incidencia de cada uno de los factores o variables presentes, pudiendo predecir

su comportamiento y respuesta cuando es sometido a unas situaciones de estrés determinadas (Muñoz, 2002; Waterloo Hydrogeologic, 2000).

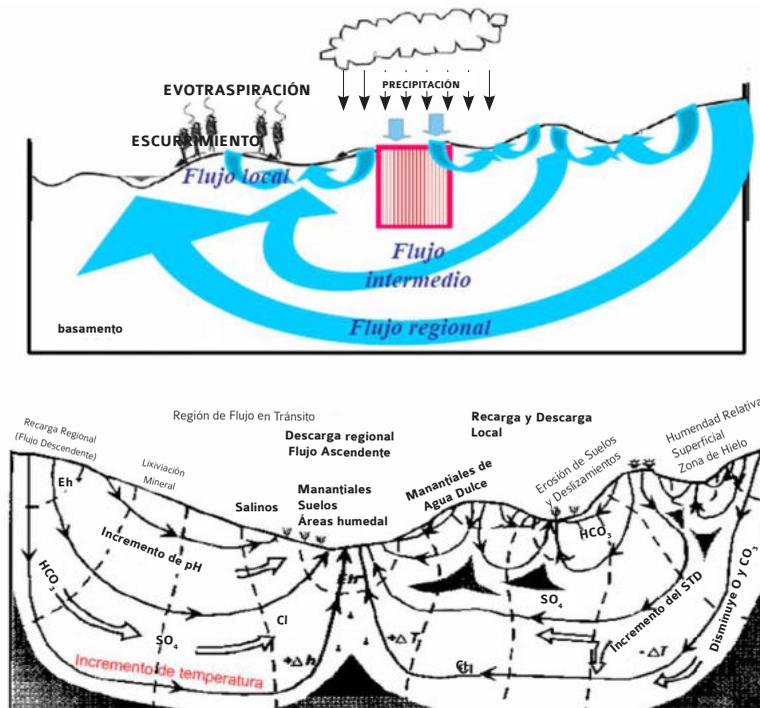


Figura 39. Sistemas de flujo de aguas subterráneas

Fuente: Tóth, 1995.

Desde el punto de vista de la aplicación de la modelización para sistemas hidrogeológicos, existen diferentes tipos de modelos, así como diferentes soportes sobre los cuales simular los procesos naturales objetos de estudio (*Ibíd.*):

- **Modelos físicos:** reproducción a escala de un fenómeno natural. (ej. modelos de tanques de arena y agua para la simulación de corrientes de flujo). El problema que presentan es que el comportamiento de los materiales utilizados, así como su escala, no reflejan en muchos casos el comportamiento natural real (*Ibíd.*).
- **Modelos analógicos:** se valen de leyes físicas parecidas a las que rigen el comportamiento del sistema para caracterizar y/o interpretar el fenómeno natural (ej modelos de membrana elástica, en la que la forma de una membrana elástica tensada se deforma exactamente igual que un cono de bombeo de agua, por lo que su ecuación coincide con la ecuación de dicho cono de bombeo). Se basan en fórmulas simples, no admiten heterogeneidades y ofrecen una solución exacta en el punto de cálculo. Actualmente no son muy utilizados (*Ibíd.*).
- **Modelos digitalizados o numéricos:** requieren una discretización espacial y temporal, y soportan heterogeneidades. Resuelven la ecuación diferencial

de la continuidad mediante matrices en cada una de las unidades (celdas) en la que se ha discretizado el sistema a simular. Son los más utilizados en hidrogeología e investigación y gestión de acuíferos contaminados. Pueden ser utilizados para simular diferentes procesos (*Ibíd.*):

- » *Modelos de flujo*: son los modelos hidrogeológicos clásicos, que informan acerca de la distribución del potencial hidráulico en el espacio y en el tiempo para cada una de las celdas definidas en el modelo (p. ej., cálculo de radios de influencia de los conos de bombeo de un campo de extracción).
- » *Modelos de transporte de masa*: se basan en el sistema de flujo definido anteriormente, y permiten calcular la concentración y establecer la evolución de una determinada especie química en el espacio y en el tiempo (p. ej., evolución de una pluma de contaminante provocada por la rotura de un tanque subterráneo).
- » *Modelos de transporte de calor*: a partir del modelo de flujo establecido, permite obtener la evolución de las temperaturas (intercambio de calor) de cada una de las unidades discretizadas del sistema en el espacio y en el tiempo. Su aplicación en hidrogeología es más limitada, no así en el campo de la geotermia o el aprovechamiento del gradiente geotérmico terrestre y de sistemas hidrotermales para el aprovechamiento energético.

2.2. Marco metodológico para la evaluación de las aguas subterráneas

En este ítem del documento se tratarán los aspectos metodológicos relacionados con las unidades de análisis, procedimientos, instrumentos, métodos y técnicas empleados para la evaluación de las aguas subterráneas en el contexto de las ERA.

2.2.1. Unidades de análisis

Las unidades de análisis hidrogeológico corresponden a unidades mayores denominadas provincias hidrogeológicas en las cuales se identifican sistemas acuíferos que podrían ser subdivididas a nivel subregional en cuencas hidrogeológicas en función de su ambiente geológico y condiciones de conexión hidráulica.

“La caracterización y cuantificación de la oferta y el uso del recurso hídrico subterráneo se realizó a escala nacional, con el propósito de calcular las reservas de agua subterránea existentes en Colombia. Dicha cuantificación se hizo para unidades de análisis regional, seleccionadas a partir de la identificación y delimitación de provincias hidrogeológicas” (IDEAM, 2010a).

“Las provincias hidrogeológicas corresponden a unidades mayores referidas a escalas menores (entre 1:10.000.000 y 1:500.000), definidas con base en unidades tectonoestratigráficas separadas entre sí por rasgos estructurales regionales, que coinciden con límites de cuencas geológicas mayores y que, desde el punto de vista hidrogeológico, corresponden a barreras impermeables representadas por *fallas regionales* y *altos estructurales*. Adicionalmente, se caracterizan por su homogeneidad geomorfológica” (*Ibíd.*).

“Estas unidades de análisis requieren de un nivel de información bajo (datos escasos y heterogéneos de varias fuentes), se representan en mapas hidrogeológicos generales y son útiles para reconocimiento nacional, pues representan grandes áreas con parámetros estáticos, sin dependencia del tiempo” (*Ibíd.*).

La delimitación en provincias se logra a partir de la cobertura de Unidades Tectónicas y cuencas sedimentarias de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) (Barrero, Pardo, Vargas y Martínez, 2007). Estos límites estructurales han sido reconocidos mediante métodos de observación geológica directos (observación de afloramientos y perforaciones) e indirectos (sensores remotos, prospección sísmica, magnetometría, gravimetría, etc.) y están ampliamente documentados en la literatura geológica nacional (Barrero et ál., 2007; Ecopetrol, 2000; Ingeominas, 2000a).

Las provincias hidrogeológicas coinciden con las cuencas sedimentarias por sus potencialidades de flujo (asociadas a ambientes y condiciones de depositación) y geometría (determinada por conspicuos rasgos tectónicos y estratigráficos resultantes de los eventos históricos). Las barreras impermeables pueden corresponder, principalmente, a macizos de rocas cristalinas (ígneas, volcánicas), a altos estructurales o a sistemas de fallas que afectan la continuidad de las unidades regionales. En este sentido, las barreras impermeables corresponden a los macizos de rocas cristalinas o volcánicas, altos estructurales y los principales sistemas de fallas que atraviesan el país.

En las ERA se requieren unidades de análisis de mayor resolución adecuadas para la toma de decisiones. Estas unidades se denominan, en este documento y en la PNGIRH, *sistemas acuíferos*.

El sistema acuífero corresponde a un “dominio espacial, limitado en superficie y en profundidad, en el que existen uno o varios acuíferos, relacionados o no entre sí, pero que constituyen una unidad práctica para la investigación o explotación” (ITGE, 1971, 1987). Esta definición necesariamente amplia y no restrictiva reconoce que el sistema es dinámico, ya que las unidades prácticas cambian en el tiempo al haber avances en la investigación, etc.; no es de extrañar, por tanto, que puedan existir críticas a cualquier clasificación rígida de los materiales permeables en sistemas acuíferos (*Ibíd.*). Estos sistemas acuíferos son susceptibles de subdivisiones en unidades menores, tal como se anotó al principio, que pueden denominarse *cuencas*

hidrogeológicas o simplemente acuíferos. La delimitación y caracterización de sistemas acuíferos permite reconocer prioridades de gestión de las aguas subterráneas. Esta caracterización comprende lo que se ha denominado Modelos Hidrogeológicos Conceptuales (MHC) que integran la información del estado y dinámica de la oferta, demanda, calidad y vulnerabilidad de acuíferos.

2.2.2. Procedimientos

En este aparte se identifican y describen los procedimientos que la autoridad ambiental debe adelantar en su área de jurisdicción para la evaluación de los sistemas acuíferos en el marco de las ERA (Figura 40).

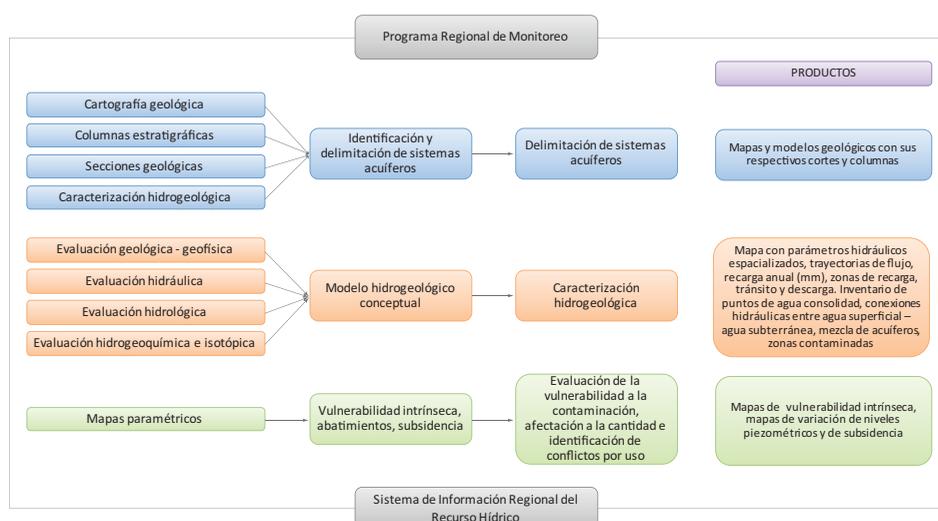


Figura 40. Procedimiento para la evaluación de sistemas acuíferos en las ERA

La delimitación de sistemas acuíferos parte de un conocimiento geológico del área de jurisdicción. Implica reconocimientos y representaciones a escalas mayores de 1:100.000 representadas en cartografía geológica-estructural, columnas estratigráficas, secciones geológicas y determinación de características hidrogeológicas generales asociadas con el conocimiento de las condiciones de porosidad y permeabilidad, cuando menos, de las unidades litoestratigráficas. De gran utilidad resulta la cartografía geológica e hidrogeológica desarrollada por el Ingeominas (hoy Servicio Geológico) a diferentes escalas y estudios geológicos, geofísicos e hidrogeológicos y análisis de registros de perforaciones de mayor detalle adelantadas en las áreas objeto de estudio. En esta etapa se obtienen, como productos, mapas y modelos geológicos con sus respectivos cortes y columnas.

Una vez se cuente con la delimitación, se deben priorizar los sistemas acuíferos atendiendo criterios socioeconómicos para definir un orden secuencial de estudio e investigación que sea vinculante con los objetivos de planificación regional definidos en Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA), Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos (PMAA) y medidas de protección y manejo

en sistemas acuíferos no priorizados en los primeros. Los sistemas de acuíferos priorizados deben ser objeto de PMAA para lo cual es necesario desarrollar un MHC, el cual ha sido tratado en el apartado anterior. Una sinergia con empresas perforadoras de pozos y usuarios de aguas subterráneas puede redundar en mejores resultados para todo el MHC. En el desarrollo del modelo hidrogeológico conceptual se obtienen los siguientes productos: mapa con parámetros hidráulicos especializados, trayectorias de flujo, recarga anual (mm), zonas de recarga, tránsito y descarga, inventario de puntos de agua consolidado, conexiones hidráulicas entre agua superficial-agua subterránea.

En los sistemas acuíferos costeros es pertinente la vigilancia permanente de la intrusión marina y la dinámica de las aguas entre ambientes marinos, transicionales y continentales. El acuífero insular de San Andrés y Providencia comporta particularidades que tienen que ver con su alta dependencia del recurso hídrico subterráneo, el control de la cuña salina y la gestión de la demanda y uso de las fuentes subterráneas.

Los sistemas acuíferos y cuencas hidrogeológicas ubicados en las grandes ciudades del país afrontan dos aspectos determinantes que deben ser objeto de gestión: i) disminución de la recarga efectiva, debido a la impermeabilización del terreno; y ii) posible contaminación debido a las actividades industriales y a las fugas de las redes de alcantarillado. Para el estudio del impacto de la impermeabilización y la contaminación del acuífero, resulta preponderante la utilización de técnicas avanzadas como la hidrogeoquímica y la hidrología isotópica.

Los acuíferos transfronterizos implican gestión con países vecinos y al respecto el programa UNESCO/OEA ISARM Américas es una iniciativa regional lanzada en 2002, en el Congreso de IAH-ALHSUD en Mar del Plata, Argentina. Resultó de los esfuerzos conjuntos de PHI-UNESCO y la OEA para implementar el Programa ISARM en el hemisferio occidental. El programa abarca tres actividades principales de carácter regional, las cuales corresponden a cuatro fases.

- El inventario exhaustivo de los acuíferos transfronterizos de las Américas, incluyendo la recopilación de datos relativos a sus características hidrogeológicas y la utilización actual de sus aguas subterráneas.
- El inventario de los marcos jurídicos e institucionales en los países de la región, en el contexto de los acuíferos transfronterizos.
- El inventario de los marcos jurídicos e institucionales en los países de la región, en el contexto de los acuíferos transfronterizos.
- Inventario y análisis de los aspectos socioeconómicos de los acuíferos transfronterizos de la región y de su gestión transfronteriza.

El Programa es coordinado por un grupo de expertos de la OEA y UNESCO-PHI y a nivel nacional es implementado por representantes nacionales designados por los Comités Nacionales del PHI. Uno de los pasos iniciales más importantes del programa fue la creación de una red de coordinadores nacionales, la cual representa

actualmente 25 países. Los coordinadores participan en los talleres anuales organizados por ISARM Américas; se responsabilizan de la respuesta adecuada por parte de sus países a los cuestionarios acordados; colaboran –frecuentemente apoyados por colegas nacionales– en la interpretación de la información; y pueden participar en cualquier otra actividad del programa ISARM Américas. Al final, se busca definir lineamientos para el manejo de acuíferos transfronterizos que puedan orientar los marcos nacionales en cuanto a la comprensión y mejores prácticas de gestión de estos acuíferos compartidos. Las publicaciones y resultados de esta iniciativa se pueden consultar en la página web <http://www.isarm.org/publications/303>.

Evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación, afectación a la cantidad e identificación de conflictos por uso, es el paso que permite –con base en el reconocimiento de las condiciones de variabilidad climática y presiones por uso y vertimientos– definir escenarios prospectivos para la protección y manejo de sistemas acuíferos. Desde luego, esta fase solo es posible si se cuenta con un MHC adecuado que se complemente con el inventario y clasificación de fuentes potenciales de contaminación, evaluación de la vulnerabilidad y riesgo de contaminación, evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos a variaciones climáticas, delimitación de regiones con agotamiento o deterioro de la calidad del agua, e identificación de conflictos por usos. Los productos obtenidos de esta fase (mapas de riesgo y vulnerabilidad, zonificación de intensidad de uso, mapas de fuentes de contaminación, etc.) combinados con los obtenidos del MHC (mapas geológicos, geofísicos, hidrogeológicos, mapas de isovalores hidrogeoquímicos e hidráulicos, mapas de isopiezas y distribución de la recarga, etc.) permiten identificar potencialidades y restricciones de las aguas subterráneas, conflictos de uso y problemática en general que deben ser mitigados con adecuadas medidas de protección y manejo (perímetros de protección de pozos, medidas de abandono de pozos, regulación de regímenes de bombeo, protección de zonas de recarga, medidas para control de vertimientos y rellenos sanitarios, monitoreo en fuentes de contaminación con redes específicas, recarga artificial, uso conjunto agua superficial-agua subterránea, control de concesiones y permisos, etc.). Es útil en esta fase el uso de modelos matemáticos.

Las consideraciones precedentes deben soportarse en un Programa de Monitoreo Regional que permite la toma sistemática de datos y en un Sistema de Información del Recurso Hídrico Regional en el cual se almacenan los datos validados del monitoreo. El monitoreo de aguas subterráneas debe ser el soporte para definir la estrategias y lineamientos de gestión para la protección y conservación del recurso hídrico subterráneo. Los resultados de la implementación del monitoreo de calidad de aguas subterráneas debe a su vez contribuir a mejorar su planeamiento, desarrollo, protección y manejo para anticipar o reducir escenarios de contaminación y deterioro del mismo.

subterráneas en relación con el subsistema de aguas superficiales con el cual está vinculado a través del ciclo hidrológico que a la postre es el marco conceptual de la gestión del recurso hídrico.

En primer lugar, es necesario reconocer que las velocidades de flujo de las aguas subterráneas son menores en varios órdenes de magnitud a las velocidades de tránsito de las aguas superficiales. Mientras las primeras se desplazan en las unidades acuíferas con orden de m/día, las segundas alcanzan velocidades del orden de los m/s. Esta diferencia trae entre otras consecuencias la atenuación de la contaminación pero a la vez la dificultad de descontaminar, una vez el acuífero ha sido afectado por actividad antrópica en su calidad.

En segundo lugar, es pertinente precisar que las unidades hidrogeológicas ocurren en ambientes geológicos que permiten almacenar y transmitir agua en cantidades apreciables o significativas. Estas unidades no necesariamente están conectadas regionalmente y sus características hidráulicas cambian tanto en la dimensión horizontal como en la vertical por la heterogeneidad, anisotropía y discontinuidad de las unidades de roca-sedimento que configuran acuíferos en el subsuelo. Los acuíferos se presentan como sistemas heterogéneos, complejos, segmentados y frecuentemente como multicapas que pueden estar interconectadas o no.

Con estos preceptos es posible configurar un escenario de monitoreo de los recursos hídricos subterráneos caracterizando la red de datos hidrogeológicos como un conjunto de actividades que se orientan a recolectar información con base en propósitos preestablecidos.

De manera particular, el monitoreo del agua subterránea puede ser entendido como un programa diseñado científicamente de continua supervisión que incluye observaciones, mediciones, muestreo y análisis estandarizado metodológicamente y técnicamente de variables físicas, químicas y biológicas seleccionadas con los siguientes objetivos (Vrba y Soblsek, 1988):

- Colectar, procesar y analizar los datos sobre la cantidad y calidad de las aguas subterráneas como línea base para reconocer el estado y las tendencias a nivel de pronóstico debida a procesos naturales e impacto por actividad antrópica en tiempo y espacio.
- Proveer información para el mejoramiento en la planeación y diseño de políticas para la protección y conservación de las aguas subterráneas.

Las metodologías de monitoreo han sido descritas por EPA, 1985; Everett, 1983; Foster, 1989; Timlim y Everett, 1978; Ward, 1979. Ahora bien, la red de monitoreo y seguimiento, más que un grupo de instrumentos para la captura de datos, debe entenderse como “un conjunto de actividades relativas a la recolección de datos, diseñados y procesados para lograr un objetivo único o un conjunto de objetivos compatibles” (OMM, 1994; WMO, 2008).

La Red de Seguimiento y Muestreo de Aguas Subterráneas debe atender un esquema conceptual basado en el conocimiento técnico-científico de las unidades acuíferas objeto de observación y medición.

En este sentido, el monitoreo de las aguas subterráneas comprende:

- Estrategias de monitoreo
- Programas de monitoreo
- Métodos de monitoreo

Estos componentes del monitoreo se desarrollan en el documento de Protocolos de Monitoreo y Seguimiento del Agua elaborado por el IDEAM como autoridad en hidrología del país y publicados en la página web de esta entidad.

2.2.3. Instrumentos

Para la evaluación y gestión de los sistemas acuíferos son pertinentes como instrumentos:

- Protocolo de Monitoreo y Seguimiento del Agua del IDEAM, en el cual hay un capítulo dedicado al muestreo y monitoreo de las aguas subterráneas.
- Formulario Único Nacional de Inventarios de Puntos de Agua (FUNIAS).
- Guía metodológica para la formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos.
- Programa Nacional de Aguas Subterráneas.
- Guía para la modelación, en su componente aguas subterráneas.
- Concesiones, permisos de vertimientos.
- Tasas por utilización del agua.

2.2.4. Métodos y técnicas

Los métodos y técnicas para la evaluación del agua subterránea en sistemas acuíferos de las áreas de jurisdicción de las autoridades ambientales se encuentran documentados en la literatura hidrogeológica. Sin embargo, es de gran utilidad la consulta del Anexo titulado "Aspectos técnicos para la formulación de planes de protección de aguas subterráneas", elaborado por Ingeominas para la Guía Metodológica para el manejo y protección de acuíferos (WMC, 2002). En esta guía se dan pautas y orientaciones para el manejo y organización de información geológica, geofísica, hidrogeoquímica y la proveniente de inventarios de puntos de agua para la elaboración de los MHC. Asimismo, hace referencia a la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación, monitoreo de niveles y calidad de agua subterráneas y evaluación de fuentes potenciales de contaminación.

Las normas y estándares para elaboración de mapas hidrogeológicos están fijados por la Asociación Internacional de Hidrogeólogos en su "Hydrogeological Maps: A Guideline and Standard Legend" (IAH, 1995).

Los elementos conceptuales y metodológicos relacionados con el seguimiento y monitoreo de aguas subterráneas se encuentran publicados en la página web de IDEAM bajo el título "Protocolo de Monitoreo y Seguimiento del Agua".

En el tema de pruebas de bombeos y ensayos hidráulicos es didáctico y práctico el "Curso Manual Tutorial de Ensayos de Bombeo de Acuíferos" (UNESCO, 2004).

Asimismo, un tema que es determinante para el MHC es la cuantificación de la recarga de acuíferos que está soportada en su totalidad en una publicación especial de la International Association of Hydrogeologist (IAH, 2002). Dada su importancia, al final de este capítulo se encontrarán algunos aspectos metodológicos básicos sobre esta variable.

También es pertinente considerar y consultar la Serie de Notas Informativas del GW-MATE publicada por el Banco Mundial, Washington D. C., EE. UU. La traducción al español fue realizada por Héctor Garduño. Está disponible en formato electrónico en la página de Internet del Banco Mundial, www.worldbank.org/gwmate, y en la página de internet de la GWP (Asociación Mundial del Agua), www.gwpforum.org (Foster y otros, 2006). Comprende notas técnicas tituladas:

- *Groundwater Management Strategies.*
- *Groundwater abstraction rights from theory to practice.*
- *Stakeholder participation in groundwater management mobilizing and sustaining aquifer management organizations.*
- *Economic instruments for groundwater management using incentives to improve sustainability.*
- *Groundwater quality protection defining strategy and setting priorities.*
- *Groundwater monitoring requirements for managing aquifer response and quality threats.*
- *Groundwater dimensions of national water resource and river basin planning promoting an integrated strategy.*
- *Groundwater dependent ecosystems characterization procedures and conservation measures.*

De los indicadores de aguas subterránea pertinentes para el nivel regional se ocupa la publicación titulada "Groundwater resources sustainability indicators" (Unesco et ál., 2007).

2.2.5. Fuentes de información

Las fuentes de información de las autoridades ambientales para la consolidación de sus MHC son:

- Publicaciones geológicas e hidrogeológicas de Ingeominas, incluido el Atlas Hidrogeológico de Colombia a escala 1:500.000 (Ingeominas, 2000b).
- Expedientes de licencias y permisos de aprovechamiento
- Registros de perforadores
- Registros de perforaciones
- Censos de usuarios
- Datos provenientes de inventarios de puntos de agua
- Pruebas de bombeo de perforaciones y pozos de producción
- Registros geofísicos de diferentes proyectos
- Información hidroclimática de la red de referencia del IDEAM y de redes regionales o locales cuando ellas existan.

2.2.6. Modelamiento espacial

Los mapas hidrogeológicos son una representación sinóptica de todos los datos relacionados con el sistema agua-tierra que alcanzan la más extrema importancia, puesto que son particularmente herramientas usadas en la descripción de situaciones estáticas y procesos dinámicos en el subsuelo en lo relacionado con el agua. Con el boom de las técnicas asistidas por computador (CAD= diseño asistido por computador y SIG) su significado está incrementándose (Struckmeir y Marat, 1995).

En lo que sigue de este capítulo, se describen y transcriben aspectos básicos que constituyen el marco lógico de la elaboración del mapa en cuestión. Por supuesto se hará alusión casi exclusiva a la guía de la IAH, pues a partir de ella se deberán definir los componentes estructurales del Mapa Hidrogeológico del área de jurisdicción de las autoridades ambientales.

Los mapas hidrogeológicos en sentido amplio tratan con el sistema complejo agua-rocas, sus propiedades e interrelaciones. El sistema es tridimensional y cubre parte de la corteza de la tierra y por consiguiente, cambia con el tiempo (particularmente el componente agua) (*Ibíd.*).

Los mapas hidrogeológicos son parte del sistema integral de representación gráfica usada en las ciencias de la tierra. Las representaciones gráficas más comunes corresponden a columnas y correlaciones estratigráficas, mapas, bloquediagramas y secciones geológicas. Los mapas y secciones verticales "son representaciones, normalmente a escala y sobre un medio plano, de una selección de aspectos materiales o abstractos, sobre o en relación a la superficie o subsuperficie de la tierra" (Anón, 1977, 1983). Sobre los mapas hidrogeológicos, en sentido amplio, estos aspectos representan datos e información acerca del agua subterránea y las

rocas, o información derivada. En cualquier caso, sobre los mapas hidrogeológicos coloreados, el color debe estar atribuido a verdadera información hidrogeológica así como a la estratigrafía o unidades del tipo de roca. Las representaciones gráficas (los mapas en sentido amplio incluyen secciones y diagramas) en hidrogeología deben ser consideradas junto con tablas, bases de datos y modelos matemáticos.

Debe recordarse que debido a la naturaleza tridimensional de los sistemas de aguas subterráneas y el propósito del mapa, el rango total de las representaciones gráficas (mapa, cortes y diagramas) debe ser considerado y usado complementariamente. En cualquier caso, un plano hidrogeológico deberá contener una sección transversal o corte, para revelar la estructura en el plano vertical.

La información obtenida de un mapa geológico para propósitos de cartografía hidrogeológica generalmente comprende dos aspectos (Figura 41):

- La conversión de unidades litoestratigráficas en unidades hidrolitológicas
- La identificación y selección de información estructural necesaria para describir y comprender la dinámica de flujo de acuíferos y aguas subterráneas, así como los tipos y condiciones de los límites controlados por la geología y la estructura.

La clasificación de rocas infrayacentes y su caracterización hidrogeológica (su capacidad de transmitir y almacenar agua) es usualmente el paso esencial en la conversión de un mapa geológico en uno hidrogeológico. Esta es una función de la descripción de facies litológicas sobre un mapa geológico, lo cual algunas veces no está disponible en detalle, especialmente si las unidades del mapa son solamente clasificadas por su edad estratigráfica. Los mapas geológicos que muestran unidades roca/tiempo son más apropiados para interpretación hidrolitológica (*Ibíd.*). La conversión hidrolitológica de un mapa geológico puede ser realizada a diferentes niveles:

1. La distinción entre rocas consolidadas y no consolidadas, permeables e impermeables se hace sobre bases crudas y cualitativas. Los cuerpos de roca considerados permeables son entonces clasificados como:
 - Continuos o discontinuos de acuerdo con la naturaleza de los cuerpos de agua subterránea contenidos.
 - Porosos/intergranulares o fisurados de acuerdo a las características de flujo dominantes.

Esto lleva a una clasificación en tres diferentes categorías (poroso, fisurado, carstificado), posiblemente complementado por clases intermedias. Muchos cuerpos de roca pueden ser diferenciados fácilmente siguiendo esta clasificación basada en datos hidrogeológicos de campo limitados.

2. La clasificación de rocas puede ser refinada sobre la base de consideraciones de permeabilidad a menudo derivadas de analogía pura entre geología (tipo

litológico de roca) e hidrogeología (valores de conductividad hidráulica K). Sin embargo, debe recordarse que los valores de K varían ampliamente en áreas con litologías uniformes. Esta clasificación semicuantitativa usualmente agrupa las unidades hidrogeológicas en:

- Formaciones permeables ($K > 10^{-1}$ m/día) formando importantes acuíferos de relativamente alta permeabilidad y productividad.
- Formaciones semipermeables (K entre 10^{-1} m/día y 10^{-4} m/día) que forman acuíferos menos productivos y acuitardos.
- Formaciones impermeables (acuicludos y acuífugas) ($K < 10^{-4}$ m/día).

La información estructural derivada del modelo geológico básico por su parte permite:

- Definir la geometría de los sistemas acuíferos.
- Determinar los límites de los sistemas acuíferos, los cuales son a menudo definidos por las estructuras geológicas.

En términos amplios, los tipos de mapas hidrogeológicos más comunes son:

- Mapas hidrogeológicos generales y de recursos potenciales de agua subterránea.
- Mapas paramétricos (este tipo incluye parámetros y variables o datos básicos o valores únicos).
- Mapas temáticos que incluyen vulnerabilidad, sostenibilidad y protección.

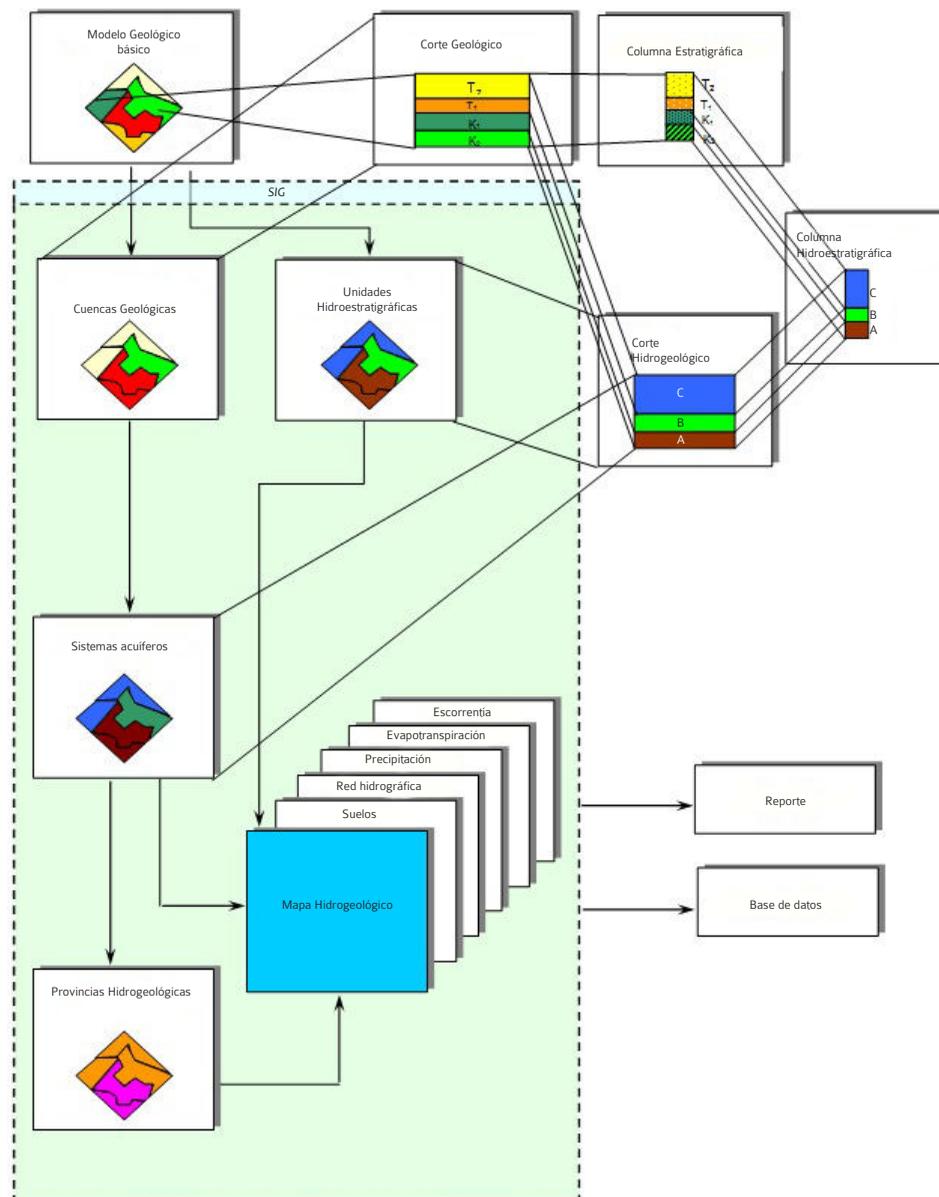


Figura 41. Esquema lógico para la elaboración de mapas hidrogeológicos

Fuente: Vargas, 2001.

2.2.7. Recarga de acuíferos

La recarga de agua a un acuífero depende de gran cantidad de variables, las cuales en muchas ocasiones no se determinan de manera exacta y sencilla y aquellas que pueden medirse de manera directa, corresponden a datos puntuales que luego deben extenderse a grandes áreas (Custodio *et ál.*, 2000). Autores como Lerner (1990) y Samper (1997) han propuesto una clasificación para los diferentes métodos de estimación de la recarga subterránea tales como medidas directas, balance de agua, técnicas de Darcy, técnicas de trazadores y métodos empíricos. Dentro de esta clasificación caben diferentes métodos para el cálculo

de la recarga reportados en la literatura. Un resumen de ellos identificando las escalas de aplicación, parámetros empleados, fortalezas y limitaciones de cada método, se presentan en una publicación especial de la Asociación Internacional de Hidrogeología (IAH, 2002).

Con la diversa oferta de métodos para calcular la recarga, la autoridad ambiental deberá escoger aquel método que se adecue a las condiciones locales y regionales de la zona, a la necesidad de datos y capacidad institucional. Considerando la unidad de análisis empleada por los métodos documentados en la publicación de IAH, en Colombia el método de Balance Hídrico es el más utilizado.

Este método está basado en el principio de la conservación de masa a una cierta región de volumen conocido (volumen de control), definida por unas condiciones de frontera, durante un período de tiempo. La diferencia en las entradas y las salidas debe ser igual al cambio en el almacenamiento de agua. La mayor parte de los métodos de balance de agua determinan la recarga a partir de los demás componentes, este tipo de balances se puede hacer en la zona superficial, en la no saturada y en la saturada (Vélez y Vásquez, 2004). La ecuación empleada es la siguiente:

$$R = P - E_s - ET - \Delta S$$

Ecuación 17

Donde:

R = recarga (mm)

P = precipitación (mm)

E_s = escorrentía (mm)

ET = evapotranspiración (mm)

ΔS = cambio en el almacenamiento (mm).

Esta ecuación es válida si se asume que la recarga es igual al flujo subterráneo o descarga y si se toma la precipitación (P) como única entrada al sistema, luego de asumir que la divisoria de la cuenca coincide con la divisoria de aguas subterráneas y por lo tanto no hay entrada de flujo desde acuíferos vecinos (Freeze y Cherry, 1979). Adicionalmente, si en la zona se tienen los caudales de extracción y de retorno al agua subterránea, estos deberán ser considerados en la anterior ecuación.

Los métodos de balance ofrecen gran disponibilidad de datos para su aplicación; son fáciles de aplicar, rápidos y de bajo costo; toman en cuenta toda el agua que entra al sistema y están disponibles para todas las fuentes de recarga. La forma más común para estimar la recarga es el método residual (Vélez y Vásquez, 2004). La mayor limitación es que la exactitud de la estimación depende de la exactitud con la cual fueron medidos los otros componentes (Scanlon *et ál.*, 2002). En algunos casos se realizan grandes simplificaciones a la ecuación de balance con el propósito de utilizar menos variables pero corriendo el riesgo de añadir mayores incertidumbres al resultado final (Freeze y Cherry, 1979). Los balances de agua fueron desarrollados inicialmente en zonas húmedas, y por lo tanto su validez en

zonas áridas y semiáridas es bastante discutible. Sus resultados pueden llegar a ser más confiables cuando se realiza el balance en suelos más desarrollados, donde se presentan mayores condiciones de humedad (Samper, 1997).

PARTE II
Elementos
conceptuales y
metodológicos
temáticos

CAPÍTULO 2
Evaluación de
la dinámica y
estado del agua
subterránea





Capítulo 3

Evaluación de la demanda de agua

Este punto aporta en la construcción de Evaluaciones Regionales del Agua abordando los aspectos relativos a la demanda de agua. La legislación sobre el agua en Colombia proporciona un marco general para su gestión como un patrimonio común y por lo tanto su propósito no es otro que el de regular las relaciones que surgen del aprovechamiento de tales recursos y de la conservación del ambiente. Estas relaciones son el producto de la conducta humana, individual o colectiva y el entorno físico y ambiental.

Si bien el marco normativo es amplio y da cabida suficiente para realizar las evaluaciones regionales de agua, las autoridades ambientales deben tomar decisiones con relación a permitir o no la extracción o una mayor extracción del recurso como lo expresa la Figura 42. La toma de decisiones la hacen las autoridades ambientales sopesando el bienestar de la sociedad y el consumo permitido del recurso que contribuye al desarrollo económico y la necesidad de conservarlo con el fin de que las generaciones futuras puedan hacer también uso del recurso. Los instrumentos contenidos en la ley, lograrán un uso adecuado del recurso.

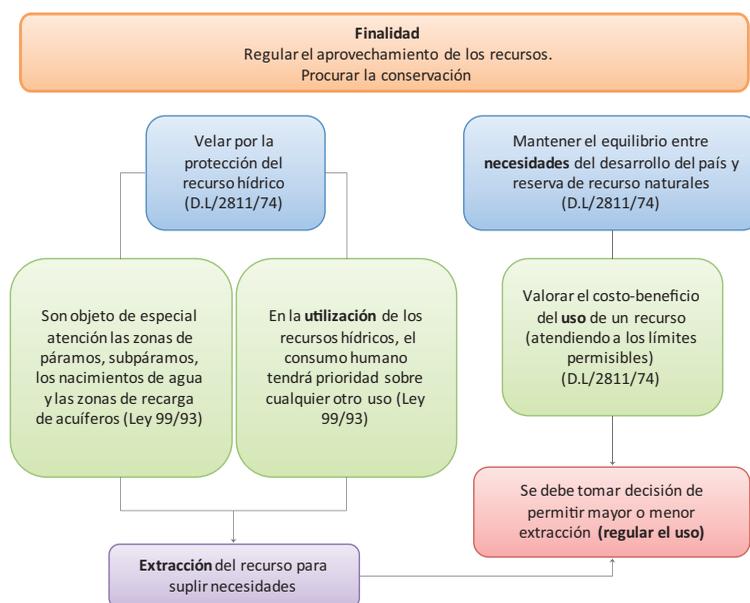


Figura 42. Alcance y finalidad del marco normativo y de política para la toma de decisiones con relación al uso del agua

Los instrumentos para la regulación del uso son variados en su clase y se orientan a soportar las asignaciones representadas en concesiones, permisos y autorizaciones, permitir conceptos previos al uso y a la realización de proyectos, soportar cobro de tasas por uso y retributivas, zonificar y establecer áreas de protección y manejo, incorporar costos ambientales, planear el manejo y ordenación de cuencas y proteger las cuencas abastecedoras.

Uno de los instrumentos más valiosos para regular la demanda de agua son las concesiones. Este instrumento a través de la regulación de la oferta, produce efectos sobre las cantidades demandadas. Las concesiones restringen el volumen a utilizar, al poner un límite en la autorización de uso, y en el tiempo de vigencia, así como para otorgarla debe ajustarse a sus requisitos, prohibiciones y restricciones de modo y de oportunidad en el uso.

En todos estos procesos, el análisis de la demanda y de los usos actuales y potenciales resulta estructural, ya sea para la elaboración de los planes de ordenación de cuencas y de ordenamiento del recurso hídrico, como para definir el otorgamiento de una concesión o la modificación de volúmenes otorgados.

La PNGIRH en uno de sus objetivos específicos propone “caracterizar, cuantificar y optimizar la demanda de agua en el país”. El logro de este objetivo comporta el diseño de estrategias relacionadas con: caracterización y cuantificación de la demanda de agua en cuencas priorizadas, fomento a la gestión integral del recurso hídrico en los principales sectores usuarios del agua, y uso eficiente y sostenible del agua (MAVDT, 2010b).

La caracterización y cuantificación de la demanda de agua en cuencas priorizadas implica “realizar inventarios y registros de usuarios (legales y por legalizar) del recurso hídrico, a nivel de cuenca priorizada en el Plan Hídrico Nacional, en relación con las aguas superficiales, subterráneas y marino-costeras. Cuantificar la demanda y calidad del agua requerida para el desarrollo de las actividades de los principales sectores usuarios del recurso hídrico, a nivel sectorial y regional. Implementar y hacer seguimiento periódico a los sistemas de medición de los consumos de agua para usuarios priorizados en el Plan Hídrico Nacional. Aplicar la metodología de balance hídrico (oferta vs. demanda) a nivel de cuenca para administrar la demanda, teniendo en cuenta el caudal mínimo ambiental” (MAVDT, 2010b).

En este sentido, este documento desarrolla un marco conceptual de la demanda hídrica y establece criterios generales para construirla.

3.1. Marco conceptual

incluyendo el concepto de caudal de retorno que tiene particular relevancia en la escala regional:

La demanda hídrica comprende la extracción de agua del sistema natural destinada a suplir las necesidades o requerimientos del consumo humano, la producción sectorial y las demandas de los ecosistemas no antrópicos. Se define como el agua extraída consumida más el agua extraída no consumida (Figura 43).



Figura 43. Conceptos básicos que definen la demanda hídrica a nivel regional

3.1.1. Conceptos básicos

- **Agua extraída:** se define como la sustracción de agua del sistema natural destinada a suplir las necesidades y los requerimientos de consumo humano, producción sectorial y demandas esenciales de los ecosistemas existentes sean intervenidos o no (IDEAM, 2010a). La extracción se realiza de fuentes superficiales y subterráneas por lo que es necesario en el cálculo del consumo diferenciar la fuente.
- **Consumo efectivo:** se refiere a la *cantidad real* de agua que es utilizada en los procesos de producción económica, de servicios y en el comercio específicamente, así como en el consumo humano como satisfactor de las necesidades fundamentales de la población en un periodo determinado (IDEAM, 2010a). El consumo efectivo regional se refiere al consumo bruto más el almacenamiento, menos las descargas (Tate, s.f.), ilustrado en la dinámica del uso del agua (Figura 44).
- **Consumo intermedio efectivo:** cuando se adolece de información sobre los consumos de agua de las actividades económicas, es necesario conocer los procesos productivos y sus actividades con el fin de establecer tales consumos.

En este sentido, da cuenta del agua usada realmente como insumo y *materia prima* en los procesos.

- **Cadena de consumo de agua:** es aplicable al uso que se hace del agua en cada una de las etapas de los procesos productivos sectoriales. Así, en el sector pecuario hace referencia a la cantidad de agua consumida o usada en cada actividad unitaria de la cadena productiva teniendo en cuenta las etapas de cría, levante, engorde y sacrificio (formal o informal) de ganado, más el consumo del recurso en labores de manejo de la población en los diferentes lugares de alojamiento y beneficio (porquerizas, galpones, plantas de sacrificio y hatos ganaderos). También hace referencia a las cadenas de consumo del sector agrícola, incluyendo etapas como la siembra, crecimiento –que se identifican con las necesidades de riego–, cosecha y poscosecha. En el sector industrial se refiere al procesamiento, lavado y enfriamiento en la obtención de los productos manufacturados, etc. (IDEAM, 2010a).

El consumo humano o doméstico de agua (residencial) no se considera una cadena de consumo, pues no es un proceso productivo el que realizan los hogares; el agua es consumida en bebida directa y preparación de alimentos para consumo inmediato; para la higiene personal y limpieza de elementos, materiales o utensilios que si bien garantizan su reproducción social, no se considera una actividad que genere rentabilidad económica (IDEAM, 2010a).

- **Caudal ambiental:** en esta guía se adopta la definición del Decreto 3930 de 2010. Entre otras cosas, el caudal ambiental debe garantizarse a lo largo de la fuente hídrica y en esta guía se considera que este caudal contribuye al sostenimiento de todos los ecosistemas sean estos acuáticos y no acuáticos. El cálculo del caudal ambiental se presenta en el capítulo de oferta hídrica superficial.
- **Caudal de retorno:** volumen de agua que se reincorpora o que es devuelto a la red de drenaje de la cuenca como remanente de los volúmenes usados o aprovechados en los procesos productivos de las actividades económicas y en el consumo humano. Las descargas o vertimientos conforman una parte del caudal de retorno. Cada uno de los sectores retorna a las fuentes agua que no fue utilizada en el proceso productivo.
- **Agua extraída no consumida:** aplicable a las demandas antrópicas en su conjunto. Llamado comúnmente en las regiones como sobrantes; se define como el volumen de agua, que es extraído del sistema hídrico y que no es utilizado *efectivamente* en ningún tipo de uso o consumo, retornando al sistema con variaciones en las condiciones de calidad originales (IDEAM, 2010a). En el caso de los acueductos se entiende como las pérdidas por mantenimiento de las redes y pérdidas técnicas.

3.1.2. Dinámica del uso y demanda de agua

La dinámica del uso del agua se ilustra en la Figura 44, en la cual el proceso se inicia con el influjo de agua o la entrada de agua para las actividades propias de ese territorio. Dicho influjo es tomado de alguna fuente que puede ser superficial o subterránea que fluye o está confinada denominada fuente abastecedora. De este influjo se extrae una cantidad destinada a los usos de las actividades económicas y al consumo humano, como fue definido previamente. La extracción puede destinarse al uso en las diversas actividades pero también se almacena artificialmente en embalses, reservorios estanques, pozos, etc. Las actividades permiten que una parte del agua usada salga y sea dispuesta nuevamente a las fuentes. Aquella cantidad de agua que no se utilizó o que habiendo sido utilizada se convierte en vertimiento, y se denomina *descargas*.

Tales descargas se vierten a alguna fuente, denominada *receptora*, pasando antes, o sin pasar por un proceso de depuración.

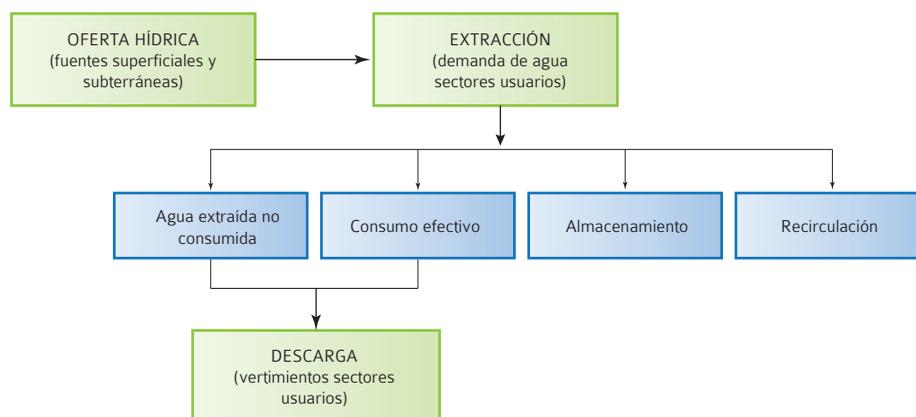


Figura 44. Dinámica del uso de agua regional

3.1.3. Los sectores usuarios objeto de análisis

Se refieren a los agentes que usan el recurso para las diferentes actividades relacionadas en el Decreto 3930 de 2010 a saber:

- a. Consumo humano y doméstico.
- b. Preservación de flora y fauna.
- c. Agrícola.
- d. Pecuario.
- e. Recreativo.
- f. Industrial.
- g. Estético.
- h. Pesca, maricultura y acuicultura.
- i. Navegación y transporte acuático.

Algunos de los sectores (tratados independientemente en el ENA, 2010) son agregados a otros por el decreto, pero esta guía incluye actividades como los servicios y el comercio, con base en los usos definidos en el ENA, 2010.

Cada uno de los sectores, en cada región y en cada área de estudio tienen sus propias particularidades y dinámicas en cuanto al uso del agua, las cuales deben ser contextualizadas, incluyendo una descripción del tamaño y localización de tales sectores, así como del tamaño y la localización de la población en la jurisdicción de la autoridad ambiental que le permita al analista, estudioso y tomador de decisiones formarse un criterio de la presión que puede tener el recurso hídrico en un área determinada y el porqué del tipo de uso.

Se trata de evaluar la demanda de agua de todos los sectores, en todas las áreas y en todas las actividades presentes en la jurisdicción. Sin embargo, es muy importante resaltar la participación de los sectores económicos en la producción de la región, así:

- Enfatizar en un(os) sector(es) particular(es) porque tiene características que lo hacen relevante en el consumo de agua en la jurisdicción de la autoridad ambiental.
- Enfatizar en áreas porque tienen conflictos de uso que las hacen relevantes.

3.2. Marco metodológico para la evaluación de demanda de agua

En este marco se consideran el proceso metodológico para la evaluación regional de la demanda de agua incluyendo los criterios generales para el cálculo, métodos, técnicas, protocolos y monitoreo de los consumos sectoriales. Se identifica la información requerida, las fuentes y análisis de calidad, así como, los principales instrumentos de referencia y las unidades de análisis.

3.2.1. Procedimiento para la evaluación de la demanda de agua en las regiones

Un esquema general del procedimiento de evaluación de la demanda de agua se ilustra en la Figura 45. Teniendo como base los conceptos es pertinente identificar los sectores objeto de análisis y la información disponible. En este análisis se reconocerán las inconsistencias, necesidades de ajuste y complementación de la información requerida para el cálculo de la demanda en función de los métodos de cálculo que se acuerden para el tratamiento estadístico de la información.

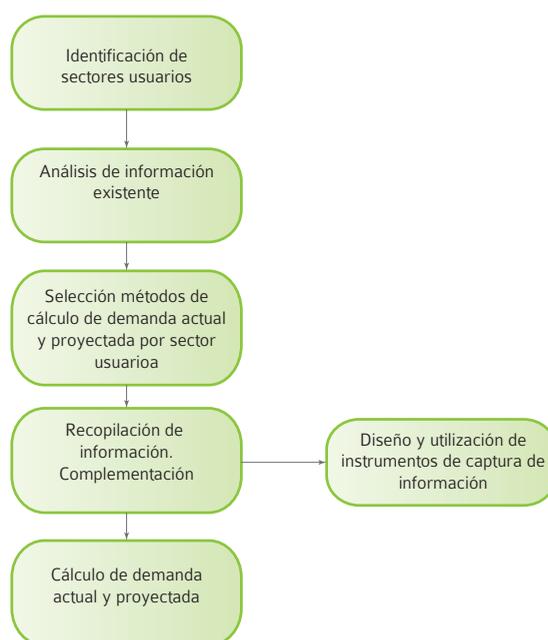


Figura 45. Procedimiento para la evaluación de demanda de agua en las regiones

En el análisis se deben considerar casos especiales que se ilustrarán al final de este capítulo. Acorde con los métodos de recolección y tratamiento de información se diseñarán los instrumentos de captura, se recabará la información necesaria y se realizarán las estimaciones de demanda actual y proyectada para los sectores usuarios y unidades de análisis seleccionadas.

A continuación se presentan las consideraciones metodológicas que se deben tener en cuenta para la estimación de la demanda total y en los diferentes sectores, así como para los casos especiales que deben considerarse.

3.2.2. Consideraciones para el cálculo de la demanda de agua

La demanda se calcula para todas las actividades en m³/ año, teniendo en cuenta su concentración y el tamaño de los usuarios en cada unidad de análisis identificada y contextualizada. Se expresa según la siguiente ecuación:

$$D_h = C_h + C_{ss} + C_{pff} + C_{sa} + C_{sp} + C_r + C_{si} + C_e + C_m + C_{sac} + C_{nt} + A_{enc}$$

Ecuación 18

Donde:

- Dh: demanda hídrica
- Ch: consumo humano o doméstico
- Css: consumo del sector servicios
- Cpff: preservación de fauna y flora
- Csa: consumo del sector agrícola
- Csp: consumo del sector pecuario
- Cr: consumo recreativo

Csi: consumo del sector industrial
Ce: consumo del sector energía
Cm: consumo de la minería
Csac: consumo del sector pesca, maricultura y acuicultura
Cnt: consumo para la navegación y el transporte
Aenc: agua extraída no consumida.

La demanda total, de agua se puede presentar de diversas maneras: por unidad de análisis, por periodo, por tipo de usuario.

La primera forma consiste en agregar la demanda en las unidades hídricas asociadas a las zonificaciones pertinentes para la autoridad ambiental regional de acuerdo con sus necesidades siempre y cuando guarde compatibilidad con aquellas de carácter nacional. Es fundamental contar con información de la localización y la georreferenciación de los usuarios.

La segunda forma, consiste en calcular la demanda para cada unidad de análisis identificada desagregada de acuerdo con la periodicidad del consumo. Este se encuentra atado a la periodicidad de la producción y de acuerdo con los registros, si estos existen. En el caso del sector primario, agrícola, pecuario y acuícola a los ciclos de siembra crecimiento y cosecha y el ciclo de vida de las especies; en el caso de los servicios, las temporadas de turismo en la región; o en el sector manufacturero, también por las épocas de mayor demanda de sus productos. A lo largo del tiempo, se pueden presentar épocas atípicas de altos crecimientos en el consumo de agua, por lo que se debe estar atento a factores que cambien el comportamiento de la producción, como un crecimiento inesperado de la demanda de un bien (boom), etc.

La tercera forma de presentación se refiere a desagregar por los tipos de usuarios, lo ideal es que las concesiones representen en el futuro la totalidad de la demanda. Es una desagregación del cálculo de la demanda total reconociendo el consumo legal y el no legal. De acuerdo con el tipo de usuario, en un primer momento realizar una imputación de consumo hasta legalizarlo y establecer su consumo real mediante mediciones.

La demanda se calculará para todas las actividades, concentración y tamaño de los usuarios en cada unidad de análisis identificada, incluyendo para aquellos usuarios con concesión y aquellos sin concesión. Cada sector presenta particularidades que deben tenerse en cuenta para la evaluación de la demanda:

a. Consumo doméstico

De acuerdo con el Decreto 3930 de 2010, se entiende por uso del agua para consumo humano y doméstico su utilización en "actividades tales como bebida directa y preparación de alimentos para consumo inmediato, satisfacción de necesidades domésticas, individuales o colectivas, tales como higiene personal y limpieza de elementos, materiales o utensilios y la preparación de alimentos en

general y en especial los destinados a su comercialización o distribución, que no requieran elaboración”.

Acorde con el decreto se propone calcular de manera independiente el consumo doméstico, el consumo en actividades de servicios y comerciales y el consumo para riego de jardines.

En el caso de **consumo doméstico**, el cálculo de la demanda se establece a partir de la estimación del consumo humano requerido para satisfacer las necesidades fundamentales de un habitante al día, teniendo en cuenta un umbral mínimo de consumo con el fin de mantener un nivel de bienestar.

La ecuación de cálculo es la siguiente:

$$Ch = P * I + pt$$

Ecuación 19

Donde:

Ch: consumo humano (m³/año)

P: población (número)

I: intensidad del consumo (adimensional)

Pt: pérdidas técnicas (m³/año).

El número de individuos o de hogares servidos por sistemas de abastecimiento de agua potable puede ser determinado a partir del número de usuarios atendidos por los acueductos municipales y veredales. Los sistemas de oferta de agua para uso doméstico obtenidos por cuenta propia son raramente medidos y existen pocos datos. Las extracciones hechas por estos sistemas pueden ser estimados usando coeficientes de consumo *per cápita* basados en un volumen razonable de agua usado por persona por día para el área de estudio.

El concepto de intensidad en el consumo hace referencia a la cantidad de agua que requiere una persona para suplir sus necesidades diarias —expresadas en litros/hab., /día—, y evidencia las diferencias en el consumo dado el clima, costumbres y cultura en cada región del país. Estas características permiten establecer consumos per cápita de acuerdo a las condiciones específicas de la zona objeto de estudio.

Las pérdidas técnicas se refieren a la cantidad de agua que es extraída y no consumida que se pierde en el sistema de distribución calculadas de acuerdo con la disponibilidad de información regional o asumiendo los criterios del Reglamento Sanitario del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) 2000.

Hay que separar el cálculo del consumo de agua cuando las viviendas también son una unidad productiva. El Decreto 3930 de 2010 dicta que se incluye en el uso para consumo humano, numeral 3 del artículo 10, “Preparación de alimentos en general y en especial los destinados a su comercialización o distribución, que no requieran

elaboración". Por lo tanto, en la estimación del consumo humano será necesario evidenciar este cálculo, bajo un criterio que permita establecer la cantidad máxima que se permite utilizar el agua para lavado de alimentos y que constituya uso doméstico.

El cálculo realizado utilizando estos parámetros, se diferencia de los módulos de consumo ya que es un consumo per cápita obtenido de los datos estratificados del SUI, al cual debe asignarse el número de personas por usuario o suscriptor. Con el consumo rural, es necesario establecer comportamientos similares si se tienen identificados algunos acueductos con micromedición.

Algunos elementos a tener en cuenta a la hora de realizar los cálculos:

- Cuando en los municipios se establece una tarifa única los consumos no se pueden controlar y tienden a ser más altos que cuando hay micromedición.
- Cuando existe un municipio con muy poca presencia de actividades industriales, se asume que el consumo de agua es solamente doméstico.
- Recopilar la información de los acueductos veredales, apuntando a que estos discriminen el consumo doméstico, industrial y comercial, y el número de suscriptores por sector, resulta de mucha utilidad.

En el caso de municipios con vocación turística es necesario estimar el flujo de población en las temporadas de turismo y establecer el incremento en el consumo.

El **consumo en actividades de servicio** incluye el uso de agua en hoteles, hospitales, colegios, fundaciones, instalaciones de la administración pública, clubes deportivos, espacios recreacionales, y otros establecimientos de servicio tales como centros comerciales, lavanderías, autolavados, estaciones de combustible (IDEAM, 2010a). Adicionalmente, se consideran en este sector los servicios de restaurantes, edificios de oficinas, instituciones militares y del Estado, y otras instituciones comerciales (OMM, 1994).

Si bien, el Decreto 3930 de 2010 no contempla **consumo para riego de jardines**, este puede ser significativo en algunas regiones. En este se incluye el uso de agua en los campos de golf, de fútbol, etc., que utilicen gramas naturales. Se desagrega del consumo doméstico porque la unidad de medida es el consumo por metro cuadrado y no por suscriptor. No se incluye en el consumo de agua en el sector agrícola pues su uso no es económico sino para la recreación y disfrute del paisaje. La manera de cálculo se expresa en la siguiente ecuación:

$$C_{ss} = C_c + O_f + O_t$$

Ecuación 20

Donde:

C_{ss}: consumo sector servicios (m³/año)

C_c: consumo en hoteles, restaurantes y establecimientos de comercio (m³/año)

O_f: consumo en instalaciones de la administración pública (m³/año)

O_t: otros (que no es posible desagregar).

La información sobre el consumo de agua de los usuarios oferentes de servicios y comercio, se puede obtener de los acueductos municipales y/o veredales y de las concesiones de agua otorgada para tales actividades. En muchos casos, las extracciones de sistemas propios pueden ser estimadas basándose en la población de los usos comerciales. Por ejemplo, el número de los estudiantes colegio/universitarios, presos en una institución penal, los trabajadores de oficinas, o la ocupación promedio de un hotel. El cálculo del agua no contabilizada incluye pérdidas desde la captación, transporte y distribución del servicio de agua.

Sobre el consumo de agua en jardines se calcula agregando la cantidad de agua en m^3 consumida en las áreas destinadas a jardines.

b) Consumo en la preservación de flora y fauna

Se refiere a su utilización en actividades destinadas a mantener la vida natural de los ecosistemas acuáticos y terrestres y de sus ecosistemas asociados, sin causar alteraciones sensibles en ellos (Decreto 3930 de 2010). Las demandas de agua para estas actividades deben considerar que un cambio en el régimen puede ocasionar cambios en la población de las especies de fauna y flora.

En esta guía se considera el caudal ambiental que incluye el caudal ecológico (CE) y no se desagrega hasta tanto se cuente con los lineamientos del MADS al respecto.

c) Consumo agrícola

Se refiere a la cantidad de agua que se requiere aportar de manera artificial para suplir las necesidades de riego de un cultivo. Se determinan por la Evapotranspiración del cultivo (ETc) menos el agua que han aportado las precipitaciones. Cuando la precipitación efectiva es mayor que las necesidades de riego, la demanda o riego bruto es igual a cero (0). En caso contrario, cuando la precipitación efectiva es menor al uso consuntivo del cultivo, la demanda se define por la diferencia entre la evapotranspiración del cultivo (ETc) y el agua que se aporta por precipitación (IDEAM, 2010a). El consumo de agua se asocia a la cadena de consumo en el sector, ya que incluye además del riego, el agua que es aplicada a aquellas actividades de poscosecha y de beneficio que no significan un proceso de transformación industrial.

La cantidad de riego requerido para un cultivo depende de un número de factores como la precipitación y las condiciones climáticas, tipo de cultivo, el periodo de crecimiento del cultivo, el método y cronograma de riego, las características del suelo, etc. Uno de los métodos para estimar el riego requerido por los cultivos más utilizados son los factores de cultivo y factores de riego disponibles en la FAO. Para grandes áreas y para áreas donde las medidas no pueden realizarse, las estimaciones del riego son necesarias; estas pueden ser hechas por métodos directos como muestras estadísticas, mapas de uso del suelo, teledetección o una combinación de todos estos métodos.

Cálculo de la evapotranspiración del cultivo:

$$ETc = Kc \times ETp$$

Ecuación 21

Donde:

ETc: evapotranspiración del cultivo (mm d-1)

Kc: coeficiente del cultivo (adimensional)

ETp: evapotranspiración del cultivo de referencia (mm d-1)

Cálculo del Coeficiente del cultivo (Kc) y Duración del período de crecimiento (Lp):

$$Kc_i = Kc_{prev} + \left[\frac{i - \sum(L_{prev})}{L_{etapa}} \right] \times (Kc_{prox} - Kc_{prev})$$

Ecuación 22

Donde:

Kc_i: coeficiente del cultivo para el día i

i: número del día dentro de la etapa de crecimiento (1-duración de la etapa de crecimiento)

L_{etapa}: etapa duración de la etapa considerada (días)

(L_{prev}): suma de las duraciones de las etapas previas (días).

Cálculo de la demanda:

$$Da = 10 \sum_{d=1}^{ip} \left[\frac{(Kc \times ETp) - \frac{P \times Ke}{100}}{Kr} \right] \times A$$

Ecuación 23

Donde:

Da: requerimiento de agua del cultivo (m³/ha)

10: es factor que aplica para convertir a m³/ha

Lp: duración del período de crecimiento

Kc: coeficiente cultivo (adimensional)

ETp: evapotranspiración de referencia potencial (mm)

P: precipitación en mm

Ke: coeficiente de escorrentía (adimensional)

Kr: coeficiente eficiencia de riego (adimensional)

A: área sembrada (ha).

El hacer un uso eficiente del riego ha permitido investigar sobre métodos a la vez más eficientes que incluyen la reducción de la demanda de agua y los flujos de retorno, mejor calidad del agua, y la reducción del gasto en riego, mientras se mantiene o se eleva el nivel de productividad de los cultivos. El agua no contabilizada incluye las pérdidas en el sistema de riego desde la captación hasta el riego *in situ*.

d. Consumo pecuario

Es la cantidad de agua que se utiliza en la cría, levante, engorde, beneficio y sacrificio asociado con la producción de carne sea esta proveniente de bovinos, porcinos, caprino y aves, producción de huevos, leche y lana y otros animales como caballos, conejos, y de animales en cautiverio para la producción de pieles. (IDEAM, 2010a). La ecuación de cálculo es la siguiente:

$$\mathbf{Csp = Cv + Cs + Cua}$$

Ecuación 24

Donde:

Csp: consumo sector pecuario (m³/año)

Cv: consumo vital en cada fase del proceso productivo por especie (m³/cab/edad) * # animales

Cs: consumo en sacrificio (m³/año)

Cua: consumo en lugares de manejo y alojamiento animal (m³/año)

La cantidad de agua superficial y subterránea, medida en metros cúbicos por año, extraída para el uso pecuario puede ser estimada a partir del número de animales existente en el área de estudio. El número de cada tipo de animales es multiplicado por el promedio de agua usada por animal para obtener una estimación del uso de agua. El agua usada por las granjas piscícolas es estimada multiplicando el volumen de agua por una tasa de aplicación.

Es muy importante contar con los inventarios ganaderos levantados por los municipios y recopilados en los anuarios que por lo general son publicados por las gobernaciones. Como la información se identifica a nivel municipal hay que establecer la proporción de animales que hacen parte del área de estudio, si este no abarca municipios completos.

e. Consumo recreativo

El uso del agua para fines recreativos sucede al menos en una situación como la siguiente: contacto primario, como en la natación, buceo y baños medicinales; contacto secundario, como en los deportes náuticos y la pesca (Decreto 3930 de 2010). Si bien se tiene una definición de los usos realizados por estas actividades, es necesario avanzar en la construcción metodológica para su contabilización. El uso recreativo entra en el caso de usos múltiples y simultáneos del recurso. Por lo general, el uso recreativo entra a competir con otros usos.

f. Consumo industrial

El Decreto 3930 de 2010 considera dentro de los procesos manufactureros aquellos relacionados con la generación de energía, minería, hidrocarburos, fabricación o procesamiento de drogas, medicamentos, cosméticos, aditivos y productos

similares, elaboración de alimentos en general y en especial los destinados a su comercialización o distribución, entre otros.

En las ERA y en el ENA se desagregan en consumos de la industria, manufacturera, minería, hidrocarburos y de la producción de energía, dado que cada uno tiene particularidades en el desarrollo de la actividad, la cual determina a su vez la manera de cálculo.

- **Consumo industrial en la ERA**

El uso industrial del agua se refiere a la cantidad de agua incluida en el proceso productivo, lavado y enfriamiento en la obtención de bienes manufacturados. La manera de cálculo se expresa en la siguiente ecuación:

$$C_{si} = G_i + P_i + C + K$$

Ecuación 25

Donde:

C_{si}: consumo del sector manufacturero (m³/año)

G_i: consumo de los diferentes sectores presentes en el área de estudio sean grandes y pequeñas unidades (m³/año)

C: construcción (m³/año)

K: ajuste por cobertura.

La información se puede obtener de los registros de los acueductos municipales, del Registro Único Ambiental (RUA) si para la región resulta representativo. Las industrias con sistemas propios de provisión de agua pueden ser estimadas a partir de muestras de instalaciones individuales. Este uso es relativamente constante a lo largo del año. Muestras estadísticas sobre usuarios de agua para la industria pueden dar alguna indicación sobre el total de agua utilizada en el sector. Es importante anotar que los grandes consumidores¹⁰ deben reportar el consumo en el RUA. El consumo de las pequeñas industrias puede lograrse a través de métodos indirectos como el hallar por medio de una muestra el uso de agua y el nivel de producción de la empresa analizada. Las pérdidas o agua no contabilizada incluyen pérdidas desde la captación, transporte y distribución del servicio de agua. El registro de las concesiones de agua se convierte en un dato básico de los consumos de agua industrial.

Algunos elementos para tener en cuenta a la hora de realizar el cálculo:

- » Si la industria toma el agua de una red de acueducto, el dato del consumo es el reportado por la empresa de acueducto.

10 El ENA 2010 definió a los establecimientos con 10 o más personas ocupadas o que el valor de su producción sea superior a 130.5 millones de pesos anuales para 2007 censados por la encuesta anual manufacturera como grandes consumidores. Los pequeños establecimientos industriales se asocian a las viviendas con actividad económica según el censo 2005.

- » Cuando la industria toma el agua de una fuente directamente, se toma el dato de la concesión si identifica el proceso productivo y el consumo de agua respectivo.
- » Consumo de agua en la construcción. Cuando la actividad es dinámica en el área de estudio es de mucha utilidad establecer aquellas obras que tienen concesiones y también aquellas que toman el agua del acueducto. También es importante conocer los estándares de consumo de agua por m³ de mezcla o la relación agua cemento para la preparación del hormigón o concreto. Si se conoce, en el área de estudio, cuántos m² de construcción se realizan en un periodo de tiempo y si se tiene claro cuánto concreto se utiliza en esta construcción, se puede tener un estimativo del uso de agua en la construcción. La fuente de información para los metros cuadrados licenciados y construidos es la oficina de planeación municipal. También se puede asumir un porcentaje del agua reportada por el SUI.

- **Consumo en generación de energía**

Esta categoría incluye el uso de agua para la generación de energía eléctrica con combustibles fósiles, y energía nuclear o geotermal (termoeléctricas), los embalses y a filo de agua. Se considera parte de la demanda hídrica teniendo en cuenta tres premisas: considerar la producción de energía como una actividad industrial, la necesidad de mantener el agua retenida por largos periodos de tiempo para mantener los estándares de generación que implican una oferta de agua no disponible, convirtiéndose en un uso excluyente y generando rivalidad entre los demandantes aguas abajo; y la variación en la calidad y en el régimen hidrológico del agua que retorna que restringe los usos que pudieran tener (OMM, 1994).

El uso a filo de agua se considera el uso cuando se desvía el cauce o una parte del mismo restringiendo el uso aguas abajo ya sea entregue a la misma fuente o a otras fuentes.

En este contexto se considera para la demanda hídrica asociada a la generación de energía hidroeléctrica a partir de embalses el volumen promedio que se mantiene almacenado, en un año base, siendo esta una variable de stock y no de flujo.

La ecuación para el cálculo del consumo del sector energético es la siguiente:

$$C_{se} = V_h + V_t$$

Ecuación 26

Donde

C_{se}: consumo hídrico del sector energía

V_h: volumen en Mm³ usado en generación de hidroenergía, incluye el almacenado en el reservorio y el que se capta durante un tramo para generación a filo de agua

V_t: volumen en Mm³ usado para generar energía en centrales termoeléctricas.

Se incluye la generación eléctrica por cualquiera de las fuentes hídricas y sus métodos (embalses o a filo de agua). Las estimaciones del agua extraída por las hidro y termoeléctricas son confiables por la existencia de bases de datos de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). La relación de la demanda hídrica asociada a la generación de energía, clasificada como uso no consuntivo, toma como referencia el volumen de agua aprovechado en un año base, siendo este una variable de stock y no de flujo. El consumo de agua en las hidro se calcula con el volumen promedio de agua embalsada durante el periodo de tiempo establecido. Mucha del agua extraída es utilizada en el proceso de condensación y en el enfriamiento de generadores y existen estimaciones estandarizadas sobre el agua consumida en estos procesos (IDEAM, 2010a).

El consumo de agua realizado en la generación a filo de agua, debe considerar varios aspectos:

- » La extracción que se hace de las fuentes constituye una demanda para la producción de energía. En el proceso se desvía el cauce o una parte del mismo, el cual no permite el uso aguas abajo en el tramo en el cual se canaliza o se desvía.
- » Una vez se devuelve el agua a la fuente, esta puede hacerse a la misma fuente o a otras fuentes.
- » Se genera un costo social dado el efecto sobre otras actividades económicas y sobre el caudal ambiental.

En principio se haría por la diferencia entre la captación que se hace del cauce por un tramo, y lo vertido (pues esta vuelve al mismo cauce o a otros) una vez se produce la energía. La unidad de tiempo es muy importante para medir luego el volumen utilizado. Por lo general, se tiene el registro de la captación pero no la medida de lo vertido. La importancia de medir este uso está relacionada con los impactos ambientales y económicos producidos en el área de captación, pues se altera el consumo aguas abajo en el tramo en que es captada y antes del vertimiento y no se respeta el caudal ecológico.

La contabilización de los volúmenes de demanda cuando los embalses tienen múltiples propósitos debe tener el cuidado de no realizarse más de una vez, toda vez que es un mismo volumen utilizado en varias actividades; por ejemplo, la producción acuícola realizada en embalses cuyo propósito es la producción de hidroenergía. En un mismo volumen de agua se realizan dos actividades; sin embargo, cuando se agregan estos consumos a la demanda total, debe tomarse el consumo principal, pero no los dos.

- **Consumo en actividades mineras**

En este ítem se considera el consumo de agua en actividades mineras e hidrocarburos. En la actividad minera se refiere a la cantidad de agua que se utiliza en la cadena de producción minera, es decir, es la cantidad que circula,

se mezcla, se reinyecta y cuya circulación permite obtener el mineral. También se refiere a la cantidad de agua que se incorpora en el proceso productivo y que no está disponible para las actividades siguientes del mismo, por efecto de la evaporación, u otros fenómenos físicos, por ejemplo, el proceso de concentración en el oro o la preparación de lodos en la perforación. El consumo efectivo de agua en minería no solo se refiere a la cantidad real que es utilizada en los procesos de producción de la minería, sino también a aquella utilizada en actividades auxiliares que soportan la producción como por ejemplo el lavado de maquinaria, la humectación de vías, etc.

En el caso de los hidrocarburos, el consumo de agua se refiere a la cantidad de agua que se utiliza en las diversas fases de exploración, explotación, transporte y refinación básica.

Las ecuaciones para el consumo de agua en minería e hidrocarburos son las siguientes:

$$C_m = C_d + C_{pp} + C_{aux} + A_{Mex} + K$$

Ecuación 27

Donde:

- C_m: consumo del sector minero (m³/año)
- C_{pp}: consumo en el proceso productivo (m³/año)
- C_{aux}: consumo en actividades auxiliares (m³/año)
- A_{Mex}: agua de mina extraída, hace parte del agua extraída no consumida (m³/año)
- K: ajuste por cobertura

Donde el Consumo en el proceso productivo (C_{pp}) se calcula:

$$C_{pp} = C_{exr} + C_{exp} + C_b + C_t$$

Ecuación 28

Donde:

- C_{exr}: consumo en la fase de exploración (m³/año)
- C_{exp}: consumo en la fase de explotación (m³/año)
- C_b: consumo en la fase de beneficio (m³/año)
- C_t: transformación (m³/año).

En cada una de las fases del proceso se identifican las actividades que consumen agua y se calcula el volumen dependiendo de la existencia de estándares de utilización por unidad de producto o por actividad. Se adiciona el consumo de agua en cada fase en m³/año que se compone del agua utilizada en cada actividad de la fase, más el agua almacenada, la extracción del agua de mina y la reinyección, según sea el caso. El consumo en actividades auxiliares se entiende como el agua que es utilizada en actividades como limpieza de maquinaria y de vehículos, humectación de vías, etc.

El uso del agua en la actividad minera es variable y depende del comportamiento del volumen de estériles, del número de personas que trabajan en las minas, el tipo de tecnología y explotación predominante (oro, aluvial y filón; carbón, socavón, cielo abierto) y de la escala de producción, entre otros. El IDEAM continuará desarrollando el tema para consolidar la metodología.

g. Consumo en Pesca, Maricultura y Acuicultura

El Decreto 3930 establece el uso para pesca, maricultura y acuicultura, entendiendo por ello la utilización del agua en actividades de reproducción, supervivencia, crecimiento, extracción y aprovechamiento de especies hidrobiológicas en cualquiera de sus formas, sin causar alteraciones en los ecosistemas en los que se desarrollan estas actividades. Con relación a la maricultura no se ha hecho la investigación pertinente para establecer qué elementos componen su definición operativa; sin embargo, es importante recordar que se debe tener en cuenta en el cálculo del consumo.

• Consumo en acuicultura

Es la cantidad de agua consumida en la producción de alevinos, juveniles, adultos y reproductores en sistemas de producción de peces en estanques y en sistemas de tierra confinados y no confinados¹¹ con sistemas de recirculación de agua y de producción controlados en agua corriente. Se identifican en la contabilización granjas dedicadas primariamente a la producción de peces sean estos tilapias, trucha y cachama bajo procedimientos controlados de alimentación, sanidad y cosecha. El agua es requerida para mantener en condiciones aceptables la cantidad y calidad del líquido de los lagos o las piscinas. La ecuación de cálculo es la siguiente:

$$Csac = (P1 * CSC) + (P2 * CNC)$$

Ecuación 29

Donde:

Csac: consumo del sector piscícola, maricultura y acuicultura

Dp: demanda piscícola

P1: producción de peces en sistemas confinados

CSC: Coeficiente rendimiento a densidades finales en sistemas confinados de tierra

P2: producción de peces en sistemas no confinados

CNC: coeficiente rendimiento a densidades finales en sistemas no confinados.

11 Las instalaciones para el cultivo pueden ser estanques seminaturales definidos como cuerpos de agua confinados que sufren cierto acondicionamiento por el hombre y se localiza de preferencia sobre terrenos arcillosos para evitar filtraciones. También se utilizan estanques artificiales, los cuales son diseñados y construidos con fines piscícolas en materiales de concreto armado. Los estanques de presa, construidos a manera de un embalse aprovechando el declive del terreno y se construye una pequeña presa de contención. Por último, los estanques de derivación que se construyen aprovechando la topografía, de manera tal que se abastecen de la derivación de un río, riachuelo o manantial hacia el estanque mediante un canal. (Tomado de: Ministerio de la Producción, Viceministerio de Pesquería Perú. 2004. Piscicultura de la Trucha).

Para calcular el consumo de agua en m³/año se utiliza la variable producción en t/año de especies como tilapia, cachama y trucha. A este valor se le asocia un valor específico correspondiente al rendimiento anual a densidades finales expresado en kg/m³. Dicho factor de rendimiento es diferente para la producción en sistemas confinados y no confinados. Se utiliza información de las encuestas piscícolas y de los registros de producción de las empresas encuestadas. El agua extraída no consumida incluye las pérdidas ocurridas por filtración y evaporación en la época crítica de estiaje. Como se calcula el consumo por la demanda de oxígeno que hacen los animales durante sus diferentes fases del ciclo de vida, el diámetro de los estanques y el número de animales es muy importante, de la misma manera que el tipo de pez y si es agua en clima frío o en clima templado (ENA, 2010).

- **Consumo en pesca y maricultura**

Según el Decreto 3930 de 2010 “se entiende por uso para pesca, maricultura y acuicultura su utilización en actividades de reproducción, supervivencia, crecimiento, extracción y aprovechamiento de especies hidrobiológicas en cualquiera de sus formas, sin causar alteraciones en los ecosistemas en los que se desarrollan estas actividades”.

En este tipo de consumo se requiere una investigación mayor para identificar formas de cálculo y la práctica de registro en las regiones; por lo tanto, aún no se desarrolla en este documento para las ERA.

- h. Consumo para navegación y transporte acuático**

Se entiende por uso del agua para transporte su utilización para la navegación de cualquier tipo de embarcación para la movilización de materiales por contacto directo (Decreto 3930 de 2010). La demanda de agua para navegación se centra alrededor de la regulación del flujo, con el fin de mantener el mínimo de profundidad requerido y la velocidad baja para una seguridad máxima y los volúmenes de agua requeridos para la seguridad del pasajero (OMM, 1994).

Como ya se consignó, este consumo se entiende como su utilización para la navegación de cualquier tipo de embarcación o para la movilización de materiales por contacto directo. En algunos casos, los requerimientos de la profundidad de navegación se calculan parcial o enteramente por el dragado del canal. Es generalmente difícil cuantificar el uso de agua para estos propósitos (OMM, 1994).

Si bien se tiene una definición de los usos realizados por estas actividades, es necesario avanzar en la construcción metodológica para su contabilización.

- **Casos especiales de cálculo por usos**

- » Usos múltiples particularmente presentados en los embalses para hidroenergía, abastecimiento y riego, pues admite el uso acuícola,

deportes náuticos y otras actividades recreativas, que implican cuantificar su demanda.

- » Uso de aguas marinas particularmente para las autoridades ambientales con jurisdicción en las costas, sobre las cuales se calcula el volumen de agua consumida. Implica entender los procesos de desalinización¹², sus elevados costes, principalmente derivados de la energía que consume, los volúmenes desalinizados y consumidos, métodos de eliminación de los subproductos que genera la desalinización¹³.
- » Cambios de uso del suelo y por ende del consumo de agua con los procesos de suburbanización o el paso de actividades menos rentables a otras más rentables, como por ejemplo, del uso agrícola al uso en turismo, que implica reconocer cambios en los volúmenes demandados así como en los requisitos de calidad necesarios.

• Casos especiales por vacíos de información

Identificados los sectores relevantes, al hacer un análisis de fuentes, se encuentra que no hay información suficiente, o no tiene la calidad necesaria para obtener resultados confiables. Por lo tanto, se hace indispensable utilizar técnicas y procedimientos particulares como encuestas o la realización de estudios particulares del sector, que implican visita a las unidades representativas en los lugares representativos y del sector representativo y tomar opinión de expertos, etc.; también puede significar combinar, en un primer momento, mientras se levanta la información, los módulos de consumo, con consultas a expertos. De la misma manera, si se tiene información parcial, se debe explicar cómo se completará la información.

Se trata de evaluar la demanda de agua de todos los sectores, en todas las áreas y en todas las actividades presentes en la jurisdicción.

En términos generales, la construcción del componente de demanda de las Evaluaciones Regionales de Agua debe considerar las debilidades de la información existente, y la capacidad particular de cada corporación. Se debe evaluar la posibilidad de tener acceso a aquella información secundaria que reemplazaría los registros o los complementaría. Sin embargo, las evaluaciones deben cumplir con un mínimo inicial bajo las siguientes consideraciones:

- » A lo largo del tiempo se debe alcanzar una cobertura del 100% del territorio de la jurisdicción, un 100% de usuarios, un 100% del consumo de agua. Sin embargo, al principio se puede abarcar una cobertura en la que se incluyan los sectores, las áreas y los usuarios más representativos.

12 La desalinización consiste en reducir el contenido mineral del agua de mar o salobre extrayendo la sal para obtener agua dulce. Se utiliza principalmente en las ciudades y la industria.

13 Cualquiera de los métodos, (por ejemplo en el océano o en pozos profundos) repercute sobre el medio ambiente. Consultado en: <http://www.greenfacts.org/es/recursos-hidricos/l-2/5-creciente-demanda.htm#3>

- » La información y las fuentes de información existentes deben ser objeto de análisis de consistencia y confiabilidad.
- » La rigurosidad del proceso debe guardarse en todas las actividades; para ello es necesario crear protocolos que incluyan aspectos como:
 - Desarrollar manuales de procedimientos sencillos, claros y completos sobre cómo realizar las actividades relacionadas con las ERA para documentar el proceso.
 - Utilizar metodologías y técnicas aceptadas para levantar y complementar información donde existan vacíos.
 - Realizar consultas a los sectores pertinentes para reconocer procesos productivos consumidores de agua y la opinión de expertos sobre el volumen de consumo en el sector.
 - Analizar y verificar los cálculos de demanda con periodicidad, al igual que analizar y verificar conjuntamente los cálculos realizados en las áreas limítrofes con otras corporaciones con el fin de adoptar criterios uniformes.

3.2.3. Unidad de análisis para la demanda, resolución espacial y temporal

Una vez se tenga contextualizada la demanda de agua, es importante identificar la unidad de análisis y diferenciarla de la unidad de medida.

- La unidad de medida mínima para la demanda es el “consumo por usuario” en una unidad de tiempo.
- El usuario está definido como persona, establecimiento industrial, comercial y de servicios, especie unidad pecuaria, cultivos en unidad agrícola, entre otros.

La unidad espacial mínima de análisis de la demanda en las ERA corresponde a las cuencas o sistemas acuíferos definidos en la zonificación hidrográfica de la autoridad ambiental. En este sentido los dominios de unidades de análisis sectoriales deben expandirse a esta unidad. En relación con la unidad temporal de análisis se considera el nivel anual aunque para cada sector se podrían tener niveles de mayor resolución de su dinámica en el tiempo.

3.2.4. Requisitos de información

Lo ideal para el desarrollo del cálculo de los consumos de agua por los diferentes sectores sería tener la siguiente información actualizados según una periodicidad suficiente para garantizar su utilidad:

- Reportes Censo de Usuarios de agua por sector con periodos de actualización razonables con la dinámica de la actividad económica y del poblamiento.
- Reportes de registros de usuarios continuos.



- Reportes del FUNIAS que, aunque no está reglamentado, es un instrumento útil al proceso.
- Reportes usos del suelo/sector.
- Reportes consumos de agua por usuario por sector de localización.
- Tasas de crecimiento de la población y tendencias de localización.
- Tendencias de crecimiento de la actividad económica.

3.2.5. Modelamiento espacial para la demanda

La espacialización de la demanda hídrica se vincula directamente con la forma en que se encuentran estructuradas las bases de datos de usuarios de la autoridad ambiental, y si estas cuentan con atributos que permitan la georreferenciación, y el conocimiento existente sobre la ubicación de las principales actividades económicas de la jurisdicción.

Para la espacialización de la demanda, la información que se requiere está compuesta de:

- **Registro de usuarios–SIRH:** registro continuo de los usuarios que se consolidan en las bases de datos del SIRH, incluye la identificación del usuario y el predio, la información de la fuente de abastecimiento, localización de las captaciones, consumos, uso/aprovechamiento del recurso hídrico y la información legal de la concesión.
- **Base predial:** es requerida porque gran parte de los procesos de reglamentación de usuarios realizados por las AA vinculan la información al predio. Utilizar la información catastral actualizada o la más reciente para la jurisdicción, va a permitir que la espacialización de la demanda hídrica se realice de manera más precisa, en una escala detallada, que va a facilitar el cruce con el componente de la oferta y el cálculo de los indicadores hídricos.
- **Cobertura de la tierra:** permite conocer la distribución de las actividades económicas, principalmente las agrícolas. Es útil para el cálculo de la demanda cuando se utilizan módulos de consumo. El 40% de las autoridades ambientales reportaron en los formatos de captura de información para la implementación del índice de uso del agua, que disponen de la cobertura del suelo para su jurisdicción o parte de ella en escalas entre 1:25.000 y 1:100.000.

Procedimiento metodológico

La información sobre el uso y demanda del agua se ha manejado históricamente de forma estadística y sin mayor rigurosidad en el componente geográfico. Comúnmente la información está agregada al nivel municipal o para la totalidad de la jurisdicción de la autoridad ambiental, lo cual, para las ERA, es un nivel espacial de baja resolución; por lo que se requiere que el levantamiento, almacenamiento

y procesamiento de la información se realice lo más desagregado posible, como mínimo al nivel de vereda (Figura 46).

Se tendría entonces que iniciar por georeferenciar los registros de usuarios del recurso hídrico, tanto superficial como subterráneo, los cuales coinciden con la información reportada en el SIRH. Dentro de esta actividad se deben incluir los procesos de reglamentación que se hayan adelantado por la autoridad ambiental.

Adicionalmente, se debe contar con la capa de información de cobertura de la tierra, la ubicación e identificación de los centros poblados al interior de la zona de estudio y los límites administrativos; si se utilizan los límites veredales del municipio, estos no podrán sobrepasar los límites municipales oficiales del IGAC; de este modo no se presentarán traslapes o vacíos entre los diferentes municipios.

El siguiente insumo para la espacialización de la demanda es proporcionado por el componente de la demanda hídrica y es primordial para los resultados del componente. Consiste en definir la unidad de cálculo, la cual puede corresponder a unidades administrativas como la vereda, es un paso intermedio para distribuir la demanda de agua en el mayor detalle posible. Es importante, que estas unidades sean posibles de compatibilizar con los puntos de interés hidrológico de la oferta superficial para que sea posible la definición conjunta de las unidades de análisis, ya que posteriormente se deben agregar los valores de la demanda de las unidades de cálculo a las unidades espaciales de análisis.

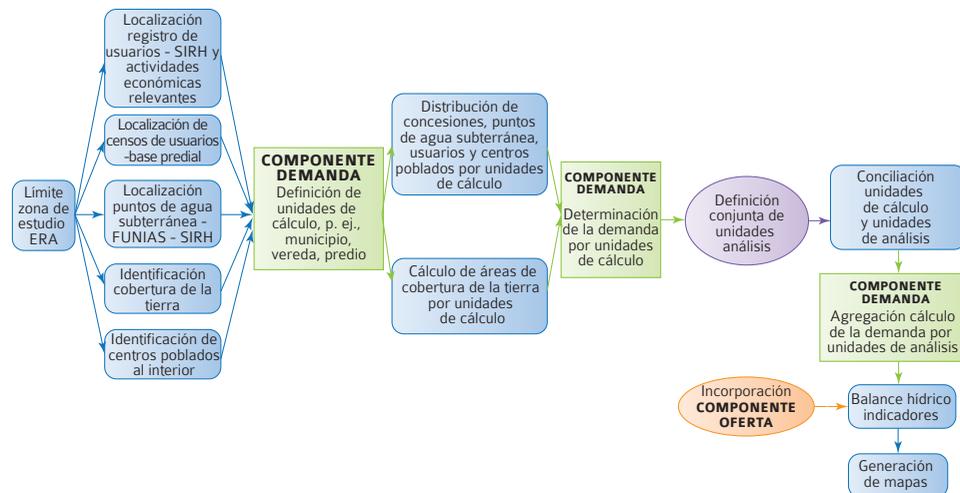


Figura 46. Procedimiento espacialización de la demanda hídrica

Después de que se encuentren definidas las unidades de cálculo, ya es posible realizar la distribución de concesiones, actividades económicas y centros poblados para cada una de estas. La cobertura de la tierra como no es una información puntual sino *areal*, requiere un cruce para establecer cuál es el área que existe de cada una de las coberturas en las unidades de cálculo.

Con esta información ya procesada se puede realizar el cálculo del componente de la demanda, el cual después se debe agregar por las unidades de análisis definidas, para esto se debe establecer la correlación de las unidades de cálculo con las unidades espaciales de análisis (Figura 47).

El valor que se le asignará a cada unidad espacial se calculará dependiendo del área que le corresponde de cada unidad de cálculo y el porcentaje que representa esta porción de territorio dentro del total. Posteriormente, se redistribuyen los valores calculados en proporción al porcentaje de área que cada unidad de cálculo tiene dentro de las unidades espaciales de análisis.



Figura 47. Unidades espaciales de análisis (cuenca río Las Ceibas)

Si la información de usuarios se encuentra georreferenciada y/o asociada a la base predial, la identificación de la unidad de cálculo y la unidad espacial de análisis van a coincidir, por lo que es posible la cuantificación de la demanda y el cálculo de indicadores con mayor confiabilidad y rigurosidad.

Los mapas que resultan principalmente de este componente son:

- Unidades de cálculo
- Usuarios–Concesiones por actividad económica
- Procesos de reglamentación en la jurisdicción
- Localización de las actividades económicas principales
- Demanda hídrica agrícola total
- Demanda agrícola por cultivo relevante
- Demanda hídrica doméstica total
- Demanda hídrica pecuaria total
- Demanda hídrica industrial
- Demanda hídrica sector eléctrico
- Demanda hídrica minería
- Demanda hídrica para otros sectores relevantes en la jurisdicción, de acuerdo al Decreto 3930 de 2010
- Demanda hídrica total.

En la Tabla 9 se hace referencia a los colores que se deben usar para representar la demanda total y de los diferentes sectores, para que sean coincidentes con el ENA, 2010.

Tabla 9. Leyenda mapas demanda hídrica

Color	DEMANDA HÍDRICA TOTAL	DEMANDA HÍDRICA POR SECTORES
	Menor de 20	Menor de 2
	20 a 50	2 a 5
	50 a 100	5 a 20
	100 a 200	20 a 50
	200 a 350	50 a 100
	350 a 500	100 a 200
	500 a 750	200 a 400
	750 a 1000	400 a 600
	Mayor de 1000	Mayor de 600

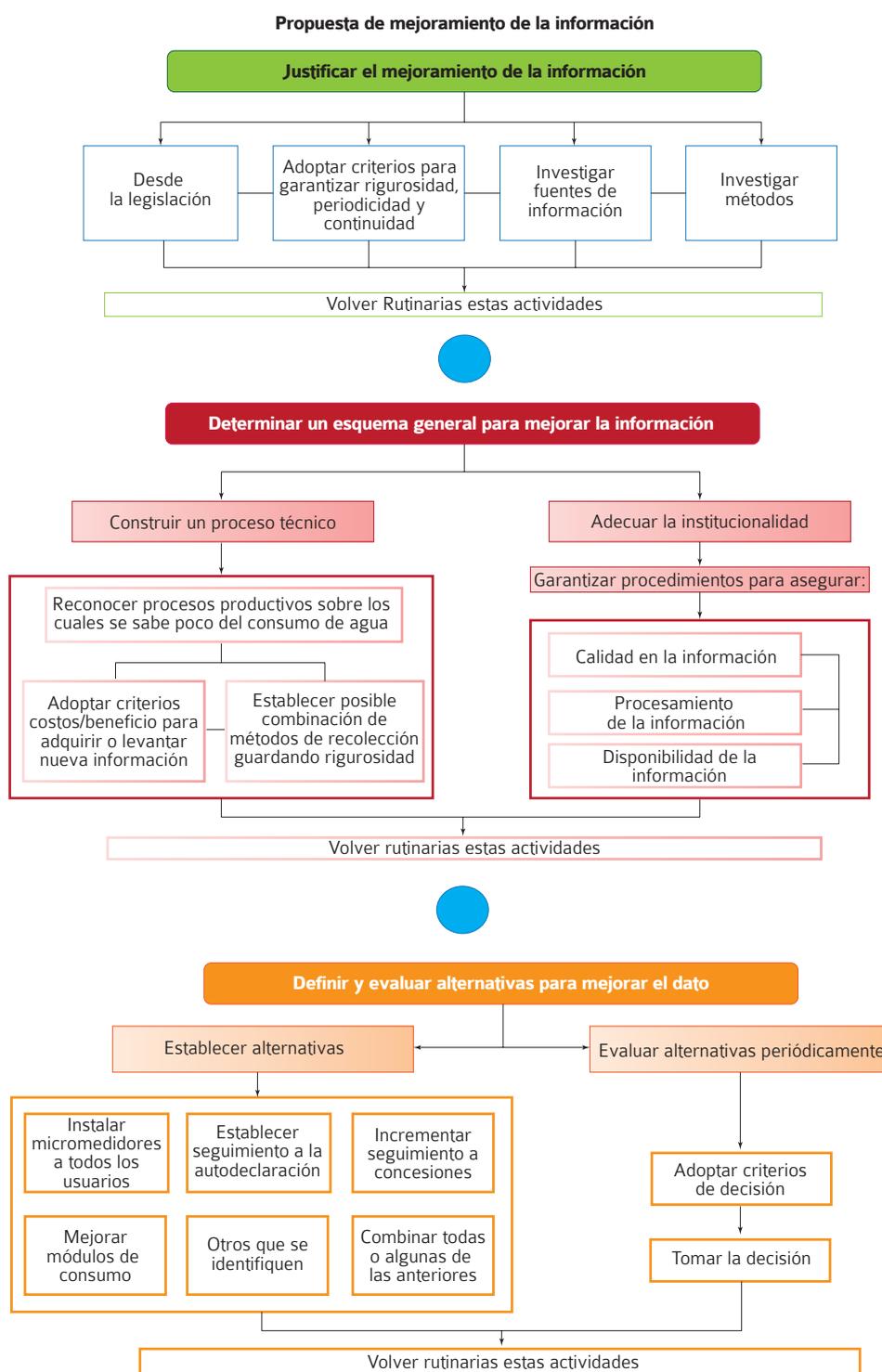
En conclusión, en la medida en que se mejoren los procesos de levantamiento y almacenamiento de la información sobre el recurso hídrico y se fortalezcan los SIG regionales, con cartográfica base de mayor escala y bases prediales; la espacialización de la demanda hídrica requerirá un menor esfuerzo técnico en la compatibilización de las unidades espaciales de análisis y se conocerán con mayor precisión y rapidez los indicadores de cada ERA.

3.2.6. Propuesta técnica para mejorar la información del consumo de agua

Con el ánimo de contribuir a mejorar los insumos para la gestión del agua en las regiones se presenta una propuesta para mejorar el dato y por ende la información sobre los consumos de agua de los sectores usuarios para la ERA. La propuesta considera la necesidad de obtener información de demanda en un proceso continuo de mejoramiento que combina fuentes de información y métodos de cálculo con rigurosidad técnica. El proceso propuesto se muestra en la Figura 48.

Se trata de construir un proceso técnico una vez se toma la decisión de mejorar la información. En este punto se trata de profundizar en las necesidades de información de la corporación por sector, habiendo realizado un diagnóstico previo, y en reconocer los métodos que se pueden usar y los criterios de decisión acerca de levantar información en campo, o adquirir información de otras fuentes.

El proceso de verificar y obtener nuevos módulos de consumo se puede hacer gradualmente, empezando por aquellos sectores sobre los que no se tenga información o donde se tengan dudas de su veracidad. Posteriormente, se puede extender hacia todos los sectores y actividades productivas presentes en la jurisdicción de la corporación.



Continúa

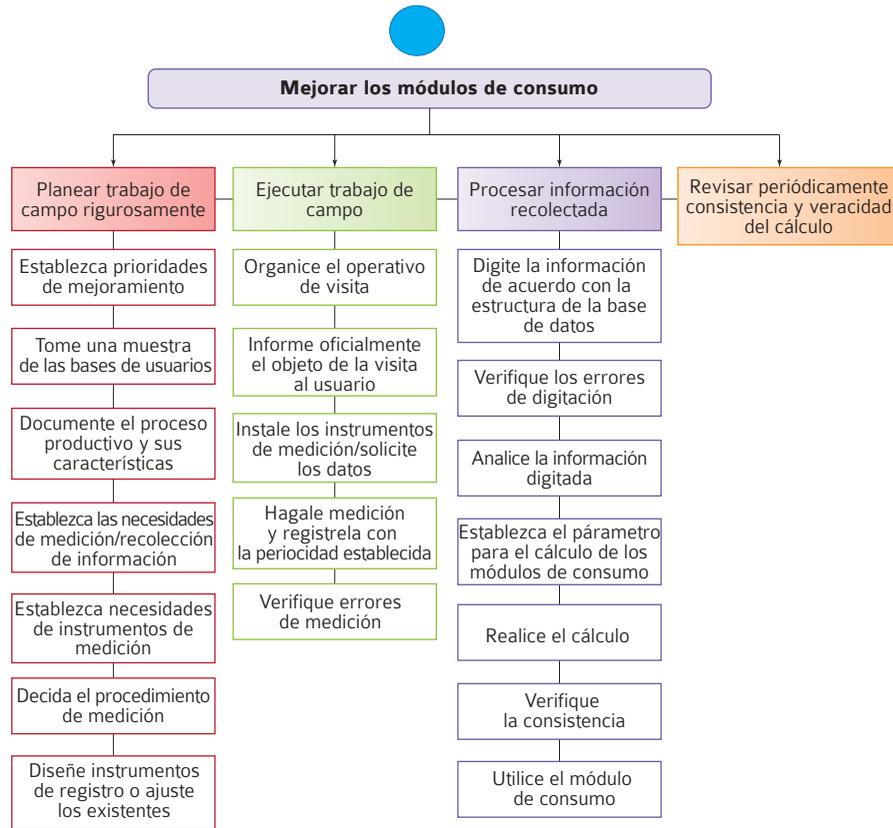


Figura 48. Mejoramiento de la información

3.2.7. Demanda proyectada de agua por sector

Dentro de la evaluación de la demanda de agua resulta especialmente importante establecer previsiones sobre su comportamiento futuro con fines de gestión y planificación.

Diferentes condiciones influyen en el comportamiento futuro de la demanda de agua: el crecimiento de la población, el crecimiento del PIB nacional y regional y el crecimiento de los sectores económicos respectivos, la nueva dotación y la expansión de las redes de servicios a comunidades que no los tenían, la evolución de los aprovechamientos hidroagrícolas, la eficiencia en el consumo del agua, entre otros.

Conocer la dinámica de la población en el territorio permitirá establecer las áreas con mayor presión sobre el agua y áreas con variaciones temporales en el comportamiento de la demanda dadas las variaciones en el crecimiento y distribución demográfica.

El comportamiento del mercado arroja señales sobre el crecimiento de la actividad económica. Cada sector desarrolla escenarios de predicción en relación con su dinámica de crecimiento que se evidencia en los niveles de producción,

el comportamiento del empleo, la existencia de ampliaciones o nuevos establecimientos, los volúmenes producidos, etc.

Los servicios, por lo general, tienen dinámicas derivadas del comportamiento del sector industrial, agrícola y pecuario, aunque también algunos servicios mantienen un comportamiento estable e independiente de los demás sectores. El comercio puede verse muy influido por una caída en el empleo, y el sector turismo puede verse influido por el comportamiento de la violencia. Por lo tanto sus proyecciones son aún más complejas en la medida en que no solo se requieren las señales del sector sino de otros a los cuales está vinculada.

Hacer previsiones de la demanda de agua, implica tener a la mano proyecciones del crecimiento de los sectores. Sin embargo, ante la incertidumbre, se deberán adoptar criterios y ahondar en el comportamiento de los sectores para establecer mediante métodos estadísticos su proyección. Por lo general, hacer estas previsiones implica el planteamiento de escenarios probables del comportamiento de la población, crecimiento económico y de la evolución de otras variables locales que influirán la demanda de agua.

Las proyecciones por sector se calculan haciendo análisis sobre el comportamiento histórico de su tamaño y adoptando criterios sobre el aumento de su capacidad de producción. Por ejemplo, “en el caso de la proyección de la demanda hídrica en las actividades de acuicultura, la variación se explica básicamente por la tendencia de crecimiento en la última década y las expectativas de consolidación de la oferta exportable. La tasa de crecimiento de la producción en este sector es muy superior a la registrada en su conjunto para las ramas de actividad agrícola, pecuaria y de silvicultura” (IDEAM, 2010a).

Fuentes de información como el DANE y el DNP, los diagnósticos de la actividad económica nacional y la participación regional en ella, el diagnóstico contenido en el plan de desarrollo departamental y nacional, estudios de prospectiva de los sectores y de las regiones son fundamentales para ello. La síntesis económica que realiza el DANE a través del sistema de Cuentas Nacionales, y de las metas y logros prospectados en el marco del Plan de Desarrollo 2010-2014 son buenos insumos para construir un criterio de comportamiento futuro del agua.

Cada sector tiene comportamientos particulares que definen que definen metodologías para estimación de demanda proyectada basadas en el conocimiento de las variables, los procesos productivos, la dinámica tecnológica, el tamaño de las unidades de análisis económico y las vinculaciones con el consumo interno de los productos y dinámicas de exportación.

Atendiendo a las particularidades regionales, el cálculo de la demanda hídrica pasa por la identificación de aquellos sectores, áreas y usuarios, lo mismo que los usos o situaciones de cambio de uso importantes por su magnitud o efecto sobre la disponibilidad del recurso ya sea porque afecta las fuentes hídricas que los abastecen o son receptoras de sus vertimientos.





Capítulo 4

Evaluación de la calidad de agua

El conjunto de conceptos, metodologías y procedimientos sobre calidad de agua para las Evaluaciones Regionales del Agua (ERA) tiene como base el Estudio Nacional del Agua 2010, los conceptos de la Directiva Marco del Agua para los países de la Unión Europea, adaptada por España en el Libro Blanco e igualmente los documentos de soporte para el Programa Nacional de Monitoreo y para la reglamentación de Decretos como el 3930 de 2010, elaborados por el MADS y el IDEAM.

4.1. Marco conceptual

Este marco de conceptos se plantea como referente para avanzar en evaluaciones regionales que se orienten a tener mayor conocimiento sobre la calidad hídrica en los ríos y cuerpos de agua del país. La propuesta para las ERA considera las limitaciones de información, instrumentos, recursos, etc., y las diferencias en las condiciones ambientales entre las regiones en el país. Sin embargo, es importante resaltar la necesidad de lograr mediante un proceso continuo y sistemático conocimiento e información sobre la calidad del agua, su estado, dinámica, alteraciones y tendencias, que permitan mejorar la gestión integral del recurso hídrico.

4.1.1. Conceptos sobre calidad de las aguas

La descripción y evaluación de la calidad de las aguas es muy compleja puesto que involucra muchas dinámicas y temas. Las evaluaciones generan también controversias en relación con las diferentes metodologías y la capacidad para informar sobre el carácter cualitativo del recurso hídrico (OECD,2001).

Es por tanto fundamental la definición que se adopte del concepto calidad del agua teniendo en cuenta que existen distintas interpretaciones. Se puede entender la calidad, desde un punto de vista funcional, como la capacidad intrínseca que tiene el agua para responder a los usos que se podrían obtener de ella o desde un punto de vista ambiental, como la define la propuesta de la Directiva Marco del Agua “como aquellas condiciones que deben darse en el agua para que esta mantenga

un ecosistema equilibrado y para que cumpla unos determinados objetivos de calidad (calidad ecológica)” (*Ibíd.*).

La calidad de las aguas no puede conceptualmente separarse de las de la cantidad, ni disociarse ni entenderse de forma separada. La acción humana influencia el régimen natural del ciclo hidrológico genera impactos tanto en términos de cantidad del agua como en las condiciones de calidad y en su variación espacio-temporal. La intensidad y extensión de esos cambios están determinadas por las características propias de estas dinámicas en el marco de los procesos del ciclo hidrológico. El crecimiento de la población y el desarrollo económico están asociados al incremento de la producción de residuos, los cuales se constituyen en fuentes potenciales de contaminación del aire, del agua y del suelo que son utilizados como receptores de estos residuos. Este crecimiento está ligado a niveles crecientes de contaminación del agua.

De forma tradicional se ha entendido por calidad de agua como el conjunto de características físicas, químicas y biológicas que hacen que el agua sea apropiada para un uso determinado. Esta definición ha dado lugar a diversa normativa, que asegura la calidad suficiente para garantizar determinados usos, pero que no recoge los efectos y consecuencias que la actividad humana tiene sobre las aguas naturales (Libro Blanco, cap. 3). La incidencia humana sobre las aguas se ejerce fundamentalmente a través del vertido a sistemas naturales de efluentes residuales. Se hace necesario establecer los criterios de calidad que han de reunir las aguas residuales antes de ser evacuadas en un sistema receptor. La consideración de los criterios de calidad de los vertidos resulta insuficiente como garantía de conservación de los recursos hídricos, de manera que estos se mantengan en condiciones tales que aseguren su disponibilidad en un futuro en cantidad y calidad adecuada. Esta garantía viene dada por el mantenimiento de las condiciones ambientales naturales que permitan preservar el equilibrio autor regulador de los ecosistemas acuáticos. Directiva Marco del Agua de la Comunidad Europea (UE, 2007).

En la Directiva Marco del Agua para los países de la Unión Europea se plantea un nuevo concepto de calidad que se desvincula de los usos, y que tiene como punto de referencia el propio recurso en sí y no los fines a los que se destina. La descripción del medio físico a partir de las condiciones de calidad de las aguas es fundamental, tanto desde el punto de vista de su caracterización ambiental, como desde la perspectiva de la planificación y gestión hidrológica, ya que delimita la aptitud del agua para mantener los ecosistemas y atender las diferentes demandas.

En el ENA 2010, se considera el concepto de calidad de la Directiva Marco del Agua¹⁴ que asume que es necesario proteger el agua más como un bien ambiental que como un recurso para ser explotado y no se pretende una caracterización en función del uso (IDEAM, 2010a). Este mismo concepto es el que orienta las ERA.

4.1.2. Modelo conceptual para la evaluación regional de calidad del agua

La Figura 49 presenta el marco conceptual general de soporte para avanzar hacia las evaluaciones de la calidad del agua en las regiones.

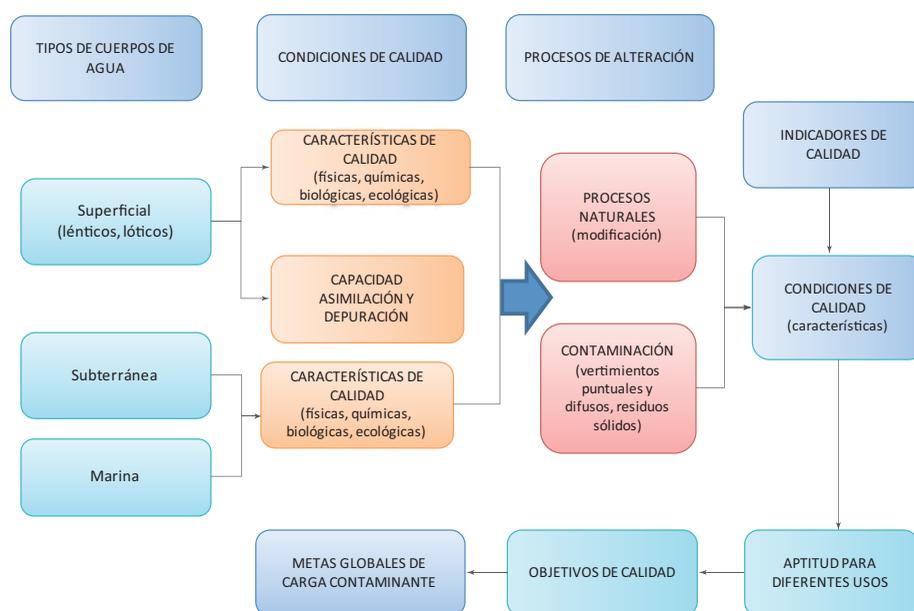


Figura 49. Modelo conceptual para la evaluación de la calidad de agua en las regiones

Teniendo como referente los procesos naturales del ciclo hidrológico y su expresión en el ámbito regional, en las ERA los tipos de cuerpos de agua superficial son los lénticos como lagunas, embalses y lóticos como ríos, quebradas, arroyos y canales; las aguas subterráneas y las aguas marinas que define el Decreto 3930 de 2010 y reglamentarios como aguas costeras o interiores¹⁵ (MAVDT, 2010).

Condiciones de calidad de agua

Las condiciones de calidad de agua están dadas por las características físicas, químicas, biológicas y ecológicas, y por la capacidad de asimilación y dilución de las corrientes y cuerpos de agua para los diferentes tipos de contaminantes. Esta capacidad de dilución y depuración depende en gran medida de las condiciones climáticas e hidrológicas y sus variaciones espacio-temporales en las regiones.

15 Aguas costeras o interiores. Son las aguas superficiales situadas entre las líneas de base recta de conformidad con el Decreto 1436 de 1984 que sirve para medir la anchura del mar territorial y la línea de la más baja marea promedio. Comprende las contenidas en las lagunas costeras, humedales costeros, estuarios, ciénagas y las zonas húmedas próximas a la costa que, verificando los criterios de tamaño y profundidad presenten una influencia marina que determine las características de las comunidades biológicas presentes en ella, debido a su carácter salino.

- *La capacidad de asimilación y dilución* definida como la “Capacidad de un cuerpo de agua para aceptar y degradar sustancias, elementos o formas de energía, a través de procesos naturales, físicos químicos o biológicos sin que se afecten los criterios de calidad e impidan los usos asignados” (Decreto 3930, 2010).

El ciclo natural del agua tiene gran capacidad de purificación. Las aguas de los ríos se renuevan continuamente, su autodepuración natural por medio de microorganismos y la eliminación de los contaminantes se realiza con cierta facilidad, a no ser que la cantidad de contaminantes sobrepase un cierto límite.

Cuando los contaminantes ingresan a los cuerpos de agua hay una sucesión de cambios que se propagan a diferentes distancias en función de la dinámica y características de las corrientes. No existe un patrón fijo y se modifica en función de la intensidad, estacionalidad e hidrografía. El grado de contaminación y de purificación natural se puede medir física, química y biológicamente, dependiendo de la naturaleza de los contaminantes (Maldonado A., Zuemmy C., s.f.).

- *Las características ecológicas* que se asocian a la calidad ambiental o calidad ecológica de las aguas, viene dada por las características que definen un ecosistema sano. Este último, se entiende como aquel que posee un alto nivel de biodiversidad, productividad y habitabilidad y que se pone de manifiesto por una serie de indicadores concretos, propios de cada ecosistema (Directiva Marco del Agua, UE.).

Los parámetros que caracterizan la calidad del agua pueden clasificarse con distintos criterios, tales como (OMM- n.º 168, 2011):

- Primera clasificación:
 - » Propiedades físicas (temperatura, conductividad eléctrica, color o turbidez, olor).
 - » Componentes químicos inorgánicos (oxígeno disuelto, cloruro, alcalinidad, fluoruro, fósforo o metales).
 - » Sustancias químicas orgánicas (fenoles, hidrocarburos clorados, hidrocarburos aromáticos policíclicos y plaguicidas).
 - » Componentes biológicos, tanto microbiológicos (coliformes fecales), macrobióticos (gusanos, plancton o peces) que pueden indicar la salud ecológica del medio ambiente acuático.
- Una segunda clasificación estaría basada en la importancia otorgada al parámetro considerado. Este planteamiento variará según el tipo de masa de agua, el uso a que se destine el agua y los objetivos del programa de control. Las variables de la calidad del agua suelen agruparse en dos categorías:
 - » Variables básicas. Hidrológicas: caudal instantáneo, velocidad, mezcla; físico-químicas: iones, sales disueltas, nutrientes, materia orgánica, microbiología, metales, contaminantes orgánicos (PNUMA, 2005); y

- » Variables relacionadas con los usos: suministro de agua potable, riego, y calidad general para la vida acuática.
- Un tercer tipo de clasificación muy útil en los procedimientos de muestreo, basado en la estabilidad, es:
 - » Variables estables (no varían materialmente a lo largo del tiempo);
 - » Variables poco estables (varían con el tiempo, aunque pueden estabilizarse durante 24 horas como mínimo, mediante un tratamiento apropiado); o,
 - » Variables no estables (varían rápidamente con el tiempo y no pueden ser estabilizadas).

Procesos de alteración de la calidad de agua

La calidad de las aguas puede verse modificada tanto por causas naturales como por factores externos. Estas alteraciones tienen origen en los procesos naturales del ciclo hidrológico y su interacción con el medio natural o procesos relacionados con actividades antrópicas. Los contaminantes antropogénicos se han dispersado ampliamente en el ambiente y están “emergiendo” en las aguas superficiales y subterráneas, como resultado de emisiones industriales, la ineficiente disposición de residuos sólidos (por ejemplo la incineración y botaderos a cielo abierto y rellenos sanitarios ineficientes), los derrames accidentales, la aplicación controlada (pesticidas en la agricultura, recarga artificial del agua subterránea, disposición en el suelo de los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales) y algunas actividades antrópicas (que incluye la excreción y la disposición natural de una amplia gama de productos químicos, tales como fármacos y productos de aseo personal). Las actividades de consumo se reconocieron recientemente como una fuente potencialmente importante de contaminación, dispersa no controlada (UNAM, 2009).

Los agentes contaminantes del agua que causan alteraciones:

- **Agentes físicos:** sedimentos, lodos, sólidos suspendidos, espumas, temperatura.
- **Agentes químicos:** cargas orgánicas biodegradables y no biodegradables (petróleo, plaguicidas, detergentes); cargas inorgánicas como metales, ácidos y minerales.
- **Agentes patógenos:** bacterias, virus, protozoarios, ciano-bacterias, mesófilos, parásitos que ingresan a las aguas provenientes de desechos orgánicos. El aumento de microorganismos patógenos transmiten enfermedades y causan ausencia o destrucción de fauna y flora acuática.
- **Sustancias radioactivas** (isótopos) que puede causar defectos congénitos y cáncer. Generan disminución de oxígeno.
- **Contaminantes emergentes:** corresponden en la mayoría de los casos a contaminantes no regulados, que pueden ser candidatos a regulación futura, dependiendo de investigaciones sobre sus efectos potenciales en la salud y los datos de monitoreo con respecto a su incidencia. Ejemplos de los compuestos que han emergido recientemente como particularmente relevantes, son los

surfactantes, productos farmacéuticos, productos para el cuidado personal, aditivos de las gasolinas, retardantes de fuego, antisépticos, aditivos industriales, esteroides y hormonas y subproductos de la desinfección del agua. Entre los contaminantes emergentes encontramos algunos que pueden presentar alteraciones endocrinas, entre los que se incluyen pesticidas, productos químicos industriales, productos farmacéuticos y fitoquímicos. Estos productos químicos se distribuyen extensamente en el ambiente, y pueden presentar efectos miméticos o antagonistas en las funciones biológicas de las hormonas naturales. La característica de estos grupos de contaminantes es que no necesitan persistir en el ambiente para causar efectos negativos, puesto que sus altas tasas de transformación/remoción se pueden compensar por su introducción continua en el ambiente. Para la mayoría de estos contaminantes emergentes, la incidencia, la contribución de riesgo y los datos ecotoxicológicos, no están disponibles. Así que es difícil predecir qué efectos de salud pueden tener en seres humanos y organismos acuáticos (Barceló, 2003).

- *Las sustancias peligrosas:* son sustancias que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radiactivas, pueden causar riesgos, daños o efectos no deseados, directos e indirectos, a la salud humana y al ambiente.
 - » En términos generales las sustancias peligrosas de mayor relevancia para el recurso hídrico son las sustancias persistentes, tóxicas, y que pueden causar bioacumulación-PTB (que causan riesgos a la salud humana y a organismos acuáticos), así como otras sustancias, elementos o compuestos que den origen a un nivel de riesgo comparable con las PTB.

Generalmente, la alteración a la calidad del agua tiene que ver con la contaminación por materia orgánica, por nutrientes y por una gran variedad de sustancias químicas y sintéticas de naturaleza tóxica. Como fuentes principales de contaminación de las aguas superficiales se destacan:

- Las aguas residuales domésticas e industriales;
- El escurrimiento de aguas en zonas de producción agrícola y ganadera;
- Las aguas lluvias por arrastre de compuestos presentes en la atmósfera, y
- Las aguas procedentes de los procesos de extracción minera.

La Figura 50 esquematiza el mapa conceptual de los agentes contaminantes y sus efectos en los seres vivos y en las condiciones de calidad del agua. Considera los diferentes tipos de patógenos, sustancias químicas orgánicas e inorgánicas, agentes físicos (sedimentos, materiales en suspensión y disueltos, contaminación térmica –cambios de temperatura–), sustancias radioactivas e impactos que generan los vertimientos relacionados con actividades antrópicas.

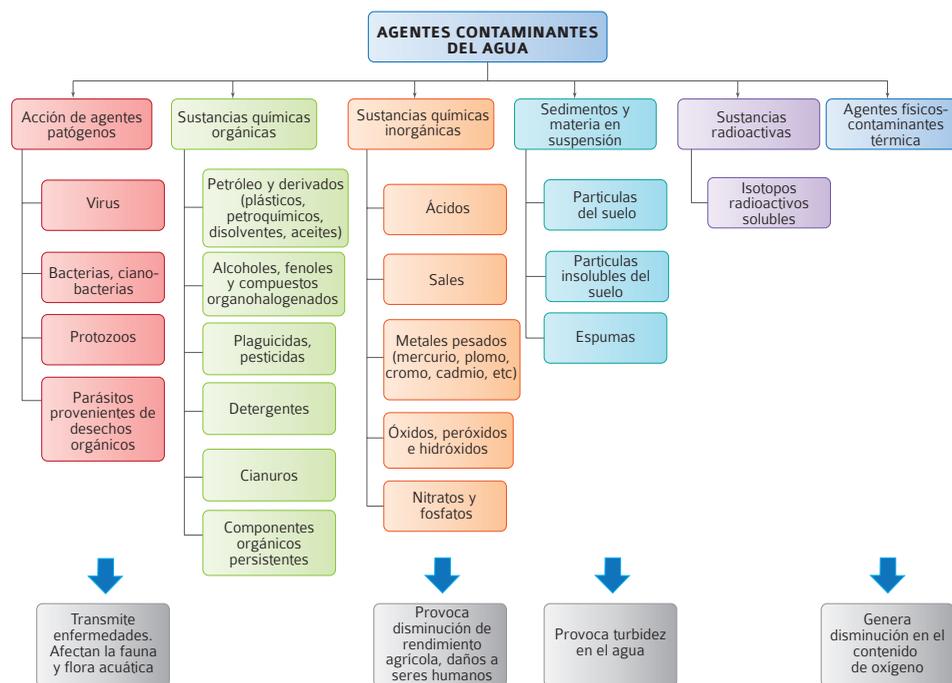


Figura 50. Mapa conceptual de la contaminación

Fuente: Modificado de Agentes Contaminantes del Agua (Universidad de Navarra).

Asociado con el mapa conceptual de la contaminación se derivan tres conceptos que se utilizarán a lo largo del documento:

La carga contaminante entendida como “el producto de la concentración másica promedio de una sustancia por el caudal volumétrico promedio del líquido que la contiene determinado en el mismo sitio; en un vertimiento se expresa en kg/día”. (Decreto 3930, 2010).

La presión ambiental definida en el ENA (IDEAM, 2010a) como “la contribución potencial de cada agente social o actividad humana (población, industria, agricultura, minería) a las alteraciones del medioambiente por consumo de recursos naturales, generación de residuos (emisión o vertimiento) y transformación del medio físico. Es decir, es la capacidad de generar un impacto ambiental”.

La afectación potencial referida a “la posibilidad de generar un grado de alteración debido a una presión ambiental; por ejemplo, un vertimiento puede generar distintos impactos ambientales en función de diversos factores: la fragilidad del medio receptor, la concentración de presión ambiental en el área (existencia de muchos vertimientos) y la capacidad de recuperación del medio receptor” (Ibíd.).

- **Procesos naturales**

En el informe “El Medio Ambiente en Colombia” se alude a que estos procesos “implican contacto y disolución de los componentes minerales de las rocas sobre las cuales el agua, en sus diferentes estados de agregación –sólido, líquido y gaseoso–, actúan como agente meteorizante, además de intervenir como disolvente de los gases presentes en la atmósfera” IDEAM, 1998.

- **Procesos contaminantes**

La Ley de Aguas de España define la contaminación (artículo 85) como “la acción y el efecto de introducir materias o formas de energía, o inducir condiciones en el agua que, de modo directo o indirecto, impliquen una alteración perjudicial de su calidad”.

En el Glosario Hidrológico Internacional se define contaminación como “Introducción en el agua de sustancias no deseables, no presentes normalmente en la misma, por ejemplo microorganismos, productos químicos, residuos o vertidos que la hacen inadecuada para el uso previsto (Unesco, s.f.). La Directiva Marco Europea define igualmente la contaminación como “La introducción directa o indirecta, como consecuencia de la actividad humana, de sustancias o calor en la atmósfera, el agua o el suelo, que puedan ser perjudiciales para la salud humana o para la calidad de los ecosistemas acuáticos, o de los ecosistemas terrestres que dependen directamente de ecosistemas acuáticos, y que causen daños a los bienes materiales o deterioren o dificulten el disfrute y otros usos legítimos del medio ambiente”.

Los residuos líquidos contaminantes generados por las diferentes actividades se presentan de dos formas: puntual o difusa (no puntual). En el primer caso, la contaminación es directa a las fuentes hídricas receptoras o a los sistemas de alcantarillado y está ligada principalmente a las actividades urbanas e industriales. En el segundo la contaminación se da de forma indirecta procedente de la agricultura a través de la escorrentía superficial, subsuperficial relacionada con fertilizantes y plaguicidas, los cuales además de los efectos sobre las corrientes pueden provocar problemas de eutrofización en los lagos, embalses y contaminación de las aguas subterráneas.

En la legislación colombiana se define *vertimiento* como “Descarga final a un cuerpo de agua, a un alcantarillado o al suelo, de elementos, sustancias o compuestos contenidos en un medio líquido” y el *vertimiento puntual* como “El que se realiza a partir de un medio de conducción, del cual se puede precisar el punto exacto de descarga al cuerpo de agua, al alcantarillado o al suelo”. Igualmente define el *vertimiento no puntual* como “Aquel en el cual no se puede precisar el punto exacto de descarga al cuerpo de agua o al suelo, tal es el caso de vertimientos provenientes de escorrentía, aplicación de agroquímicos u otros similares” (Decreto 3930, 2010).

La extracción de agua de una fuente hídrica abastecedora ingresa con unas condiciones de calidad determinadas (de la fuente), se utiliza en los diferentes procesos propios de cada actividad social o productiva los cuales, a su vez, alteran sus condiciones físicas, químicas y biológicas. El agua que no fue consumida se descarga, una vez se surten los procesos de depuración cuando hay tratamiento previo. Estos vertimientos residuales con cargas contaminantes, diferenciadas según la actividad, ingresan a las corrientes y cuerpos de agua receptores alterando las condiciones de calidad de sus aguas en los aspectos físicos, químicos, biológicos y ecológicos. Este proceso se denomina “descargas”, es decir, la cantidad de agua que se permite salir de la actividad (*Universidad de Navarra. Agentes Contaminantes del Agua*).

La contaminación del medio ambiente por herbicidas, plaguicidas, fertilizantes, vertidos industriales y residuos de la actividad humana es uno de los fenómenos más dañinos para el medio ambiente. Los contaminantes son en muchos casos invisibles, y los efectos de la contaminación del agua pueden no ser inmediatamente evidentes, aunque resultan devastadores a largo plazo (*ibíd.*).

- **Contaminantes comunes en el agua superficial**

En el Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2010a) se reportan como principales contaminantes, por la magnitud de la carga aportada a los cuerpos de agua superficiales, los siguientes: materia orgánica biodegradable y no biodegradable, sólidos suspendidos y nutrientes. Además se consideran relevantes los aportes de sustancias tóxicas como el mercurio, proveniente de los procesos extractivos de oro y plata y los agroquímicos. Se analiza la carga contaminante que ejerce mayor presión sobre la calidad del agua por materia orgánica, sólidos en suspensión y nutrientes a través del Índice de Alteración potencial de la Calidad del Agua (IACAL) y las zonas donde se concentran.

Por otro lado, el estudio sobre el análisis del sector de agua potable y saneamiento en Colombia (CRA, 1997) incluye un diagnóstico sobre el origen y distribución geográfica de las principales fuentes de contaminación hídrica. El estudio sostiene que las principales fuentes de contaminación están constituidas por las descargas de los sectores agrícola, industrial y doméstico. Además, estimó la descarga diaria de aguas residuales en vertimientos puntuales en cerca de 4.500.000 m³, de los cuales un alto porcentaje corresponde a aguas residuales domésticas e industriales transportadas por alcantarillados.

El anexo titulado “Impacto del sector sobre la calidad del recurso hídrico” del mismo estudio reporta que la contaminación es causada por diversos tipos de contaminantes entre los que se cuentan materia orgánica, microorganismos patógenos y compuestos tóxicos, que se originan en los sectores doméstico, industrial y agropecuario, los cuales producen aproximadamente 9000 toneladas diarias de materia orgánica contaminante medida como Demanda Bioquímica de

Oxígeno (DBO). Los resultados de muestreos efectuados en las principales ciudades del país, indican que la contaminación por patógenos se origina principalmente por los residuos líquidos domésticos (*Ibíd.*).

Entre las sustancias tóxicas vertidas al agua se citan los metales pesados como plomo, cromo, mercurio o cadmio; compuestos orgánicos volátiles y los solventes y halogenados los cuales representan riesgos para la salud humana y pueden destruir la vida acuática. Otros residuos líquidos peligrosos provienen de centros de salud, de la industria química y de la de curtiembres. La industria de refinación de petróleo descarga a los cuerpos de agua compuestos altamente tóxicos como fenoles, mientras que la industria química descarga en los cuerpos de agua marítimos y continentales, compuestos orgánicos volátiles y metales pesados (mercurio y cadmio, entre otros) y la industria de curtiembres vierte metales pesados altamente tóxicos como el cromo.

Finalmente, el estudio reporta que algunos residuos peligrosos se depositan en los sedimentos en el fondo de los ríos, lo que favorece que se mantengan altas concentraciones de tóxicos en solución en el agua, este es el caso del río Bogotá en cuyos sedimentos se han encontrado altas concentraciones de cromo y plomo. Otra fuente de contaminación la constituyen los aceites lubricantes, los cuales son vertidos sin tratamiento en la mayoría de los casos. Por ejemplo, la CAR estimó que en 1989, cerca de 250.000 barriles de aceite de motor se vertieron al alcantarillado de la ciudad capital y por ende al río Bogotá (*Ibíd.*).

Existen problemas de contaminación comunes a las actividades humanas generadoras de los mismos tipos de sustancias, algunos de ellos tienen efectos en escala global. En la Tabla 10 se presentan los principales tipos de contaminantes en diferentes tipos de cuerpos de agua y la magnitud relativa de los daños que ellos causan. Esta tabla ha sido elaborada en escala global, por tanto en niveles menores las calificaciones pueden variar de acuerdo con el estado de desarrollo económico de los países y los usos del suelo.

Tabla 10. Mayores problemas de calidad del agua superficial a escala global

Tipo de contaminante o problema de contaminación	Cuerpo de agua		
	Ríos	Lagos	Agua subterránea
Patógenos	xxx	x ¹⁶	x
Sólidos suspendidos	xx	NA	NA
Materia orgánica biodegradable ¹⁷	xxx	x	x
Eutroficación	x	xx	NA
Nitrato como contaminante	x	0	xxx
Salinización	x	0	xxx
Elementos traza (pesticidas, metales)	xx	xx	xx ¹⁸
Microcontaminantes orgánicos	xxx	xx	xxx
Acidificación	x	xx	0

xxx Deterioro de la calidad grave o de escala global

xx Deterioro importante

x Deterioro ocasional o regional

Fuente: Adaptada de Unesco, (WHO & UNEP, 1999).

En Meybeck y Helmer (1989), se encuentra una discusión sobre las fuentes y efectos de estos tipos de contaminantes.

• **Aptitud para diferentes usos**

La legislación colombiana establece la clasificación de las aguas con respecto a los vertimientos (artículo 205 del Decreto 1541 de 1978) definiendo los de clase I como aquellos cuerpos de aguas que no admiten vertimientos, y los de clase II como los cuerpos de agua que admiten vertimientos con algún tratamiento.

En el Decreto 3930 de 2010, artículo 19, se refieren los *criterios de calidad para destinación del recurso* entendiéndolos como el conjunto de parámetros y sus valores utilizados para la asignación de usos y como base de decisión para el Ordenamiento del Recurso Hídrico. Los usos del agua, los criterios de calidad para el uso de las aguas superficiales, subterráneas y marinas serán definidos por el MADS.

En relación con el Ordenamiento del Recurso Hídrico en este mismo decreto art. 4, parágrafo 1, se considera el cuerpo de agua y/o acuífero como un ecosistema. Establece que la autoridad ambiental competente debe realizar la clasificación de las aguas superficiales, subterráneas y marinas, fijar en forma genérica su destinación a los diferentes usos y sus posibilidades de aprovechamiento con fundamento en la priorización definida para tales efectos en el artículo 41 del Decreto 1541 de 1978; define los objetivos de calidad a alcanzar en el corto, mediano y largo plazo; establece las normas de preservación de la calidad del recurso para asegurar la conservación de los ciclos biológicos y el normal desarrollo de las especies; determina los casos en que deba prohibirse el desarrollo de actividades como la pesca, el deporte y otras

16 Principalmente en lagos pequeños y someros.

17 Diferente de la resultante de la producción primaria acuática.

18 Provenientes de rellenos sanitarios y depósitos de residuos de minería.

similares, en toda la fuente o en sectores de ella, de manera temporal o definitiva; fija las zonas en las que se prohibirá o condicionará, la descarga de aguas residuales o residuos líquidos o gaseosos, provenientes de fuentes industriales, domésticas, urbanas o rurales, en las aguas superficiales, subterráneas o marinas.

- **Indicadores de estado de la calidad del agua y de presión por contaminación**

La calidad de diferentes tipos de agua se ha valorado a partir de variables físicas, químicas y biológicas, evaluadas individualmente o en forma grupal.

Los parámetros físico-químicos dan una información extensa de la naturaleza de las especies químicas del agua y sus propiedades físicas, sin aportar información de su influencia en la vida acuática; los métodos biológicos aportan esta información pero no señalan nada acerca del contaminante o los contaminantes responsables, por lo que muchos investigadores recomiendan la utilización de ambos en la evaluación del recurso hídrico (Orozco *et ál.*, 2005)

Los indicadores propuestos para evaluar el estado de la calidad físico-química y biológica del agua y las presiones por contaminación son:

- » *Índice de Calidad del Agua (ICA)*, como indicativo de las condiciones de calidad físico-químicas y microbiológicas en las corrientes y cuerpos de agua superficial.
- » *Índice de Macroinvertebrados Acuáticos (IMA)*, como indicativo de condiciones de calidad biológica de las corrientes y cuerpos de agua superficial.
- » *Índice de Afectación potencial a la Calidad del Agua (IACAL)*, como indicativo de presión por contaminación.

- **Objetivos de calidad**

Una vez se establecen las condiciones de calidad de las aguas superficiales, situación actual, para mejorar el estado y pasar a una condición posible y deseable, se busca garantizar los niveles de calidad del agua teniendo como referente el establecimiento de objetivos de calidad y su relación con la disponibilidad hídrica, la aplicación de instrumentos económicos, entre otros.

El Decreto 2667 de 2012 define objetivos de calidad como el “conjunto de variables, parámetros o elementos con su valor numérico, que se utiliza para definir la idoneidad del recurso hídrico para un determinado uso”.

En el artículo 8 del mismo decreto, se define que “la autoridad ambiental competente establecerá cada cinco años, una meta global de carga contaminante¹⁹ para cada

19 La meta global será definida para cada uno de los elementos, sustancias o parámetros, objeto del cobro de la tasa y se expresará como la carga total de contaminante a ser vertida al final del quinquenio (Decreto 2667, 2012).

cuerpo de agua o tramo del mismo”, y que “establecerán la meta global que conduzca a los usuarios al cumplimiento de los objetivos de calidad establecidos por dichas autoridades”.

En el ejercicio de implementación de la tasa retributiva, 37 de 39 autoridades ambientales han establecido objetivos de calidad en parte o la totalidad de los cuerpos de agua (PNGIRH, 2010).

La PNGIRH establece como meta para la reducción de la contaminación del recurso hídrico, el alcance de los objetivos de calidad en al menos el 70% de los cuerpos de agua priorizados en el Plan Hídrico Nacional.

4.1.3. Los sectores usuarios objeto de análisis para la evaluación regional de calidad del agua

Las ERA deben dimensionar y contextualizar la localización de los usuarios generadores de vertimientos, analizar la presión que pueden ejercer sobre la calidad del agua en un área determinada por el tipo de uso, la carga contaminante que vierten y los impactos que generan sobre las condiciones de calidad del agua en los cuerpos de agua.

En concordancia con el Decreto 3930 de 2010, los principales usos a tener en cuenta para evaluar la presión por vertimientos de cargas contaminantes son los siguientes:

- Uso humano y doméstico (incluye actividades comerciales y de servicios)
- Uso industrial (actividades de manufactura, generación de energía, minería e hidrocarburos)
- Uso agrícola
- Uso pecuario
- Pesca, maricultura y acuicultura.

En cada caso, los procesos contaminantes están determinados por el vertimiento de elementos, sustancias o compuestos a un cuerpo de agua y por su influencia negativa sobre la aptitud del agua para satisfacer determinados usos u objetivos de calidad.

4.1.4. Particularidades de la evaluación hidrogeoquímica y la calidad de las aguas subterráneas

En capítulos anteriores se han detallado los conceptos básicos de aguas subterráneas y los primeros modelos que se deben tener en cuenta para abordar su evaluación. Sin embargo, la complejidad del ciclo hidrológico, obliga a utilizar técnicas más avanzadas como la hidrogeoquímica y la hidrología isotópica para la comprensión de la dinámica de las aguas subterráneas.

Los estudios hidroquímicos revelan una cantidad cada vez mayor de información que está codificada en el agua durante este ciclo. Corresponde al hidrogeoquímico descifrar esta información y traducirla a términos que puedan utilizarse para la gestión del agua. (Mazor, 2004).

Paralelamente a la hidrogeoquímica, se han utilizado desde los años 50 técnicas como la hidrología isotópica, la cual constituye una de las técnicas empleadas para la evaluación y modelización de cada uno de los compartimentos del ciclo hidrológico. El estudio de los isótopos del agua en los acuíferos permite, en ciertas condiciones y en complemento del análisis geoquímico, acceder a cierto número de informaciones (Campillo, 2012) concernientes a:

- La relación con las precipitaciones localmente: recarga actual, procesos eventuales de evaporación en curso de la infiltración.
- El origen del agua que participa en la recarga en la situación de orígenes diversos de las masas de agua.
- Las zonas de recarga, y específicamente su altitud.
- La determinación de zonas de mezcla de agua entre dos acuíferos de composición isotópica diferente (ejemplo drenaje de acuíferos superpuestos) o identificación de zonas de intrusión marina.
- Evidenciar procesos de interacción entre la roca y el agua: geotermalismo.
- Determinar procesos de evaporación directamente a partir del acuífero (nivel piezométrico cerca de la superficie en zona árida).
- Determinar interacciones entre aguas superficiales-aguas subterráneas.

En complemento, se tiene la posibilidad también de determinar la edad de residencia del agua en el acuífero utilizando el decaimiento radioactivo de ciertos isótopos, siendo los más utilizados actualmente: ^3H (tritio), ^{14}C (carbono 14), ^{36}Cl (cloro 36), para los acuíferos que tienen tiempos de residencia más cortos (algunas decenas de años) a los más largos (algunas centenas de millares de años) (*Ibíd.*). Para mayor información sobre los usos de los isótopos en hidrología es conveniente utilizar el libro de la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA): “*Isótopos Ambientales en el Ciclo del Agua*” (AIEA, 2008).

La calidad del agua queda definida por su composición, y el conocimiento de los efectos que puede causar cada uno de los elementos que contienen o el conjunto de todos ellos, permite establecer las posibilidades de su utilización (Custodio y Llamas, 2001). De esta manera, se entiende que la evaluación de la calidad del agua subterránea corresponde a un proceso investigativo donde se integran conceptos de geología y química del agua, necesarios para el entendimiento de todas las reacciones roca-agua. Este capítulo se enfoca en la evaluación hidrogeoquímica.

La incorporación de los constituyentes al agua en variedad y concentraciones diferentes es posible debido a su elevado poder disolvente y a sus propiedades de combinación. Esta incorporación de sustancias al agua comienza incluso antes de que se incorpore al sistema de flujo subterráneo propio de cada acuífero;

gases, aerosoles, polvo y sales diversas presentes en la atmósfera reaccionan con el agua marcando el primer esbozo del quimismo del agua de infiltración (IGME, 1995).

Los factores que condicionan entonces la composición del agua subterránea natural son múltiples. Entre ellos cabe citar: naturaleza y disposición espacial de los materiales con los que el agua entra en contacto, superficie y duración del contacto, temperatura presión, existencia de gases, grado de saturación del agua en relación con las distintas sustancias incorporables, etc. (*Ibíd.*).

Aunque la composición media del agua subterránea suele considerarse invariable en un acuífero o porción del mismo, no debe olvidarse que las interacciones agua-medio, que determinan dicha composición, son procesos dinámicos que se desarrollan, a ritmo diverso tanto en el espacio como en el tiempo. En consecuencia, la composición del agua subterránea natural debe contemplarse con la perspectiva de su posible variación espacio-temporal. Una composición química concreta por lo tanto no queda completamente definida si no se refiere a un lugar y momento determinados (*Ibíd.*).

A pesar de la gran variabilidad de los elementos presentes en el agua subterránea y de la de sus concentraciones estos han sido clasificados completando la clasificación de Freeze y Cherry (1979) por su frecuencia de aparición y valor de concentración decreciente en:

- Constituyentes mayoritarios o fundamentales:
Aniones: $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$, Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^{2-}
Cationes: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+
Otros: CO_2 , SiO_2 , O_2
- Constituyentes minoritarios o secundarios:
Aniones: F^- , S^{2-} , Br^- , NO_4^{2-} , PO_4^{2-}
Cationes: Mn , Fe , Li , Sr , Zn .

En un agua natural dulce estos constituyentes aparecen por lo general en forma iónica (sales casi totalmente disociadas). El agua subterránea natural, como consecuencia de su composición química y de acciones naturales externas, presenta una serie de propiedades o características fisicoquímicas: color, turbidez, sabor, temperatura, conductividad eléctrica, dureza, etc. Estas propiedades varían en el espacio y en el tiempo (IGME, 1995).

Dentro del ciclo hidrológico pueden distinguirse a grandes rasgos tres sistemas o ámbitos en que el agua adquiere y ve modificado su quimismo: atmósfera, zona no saturada y zona saturada. La atmósfera está constituida por gases, aerosoles, polvo atmosférico y sales de diversa procedencia que reaccionan con el agua de lluvia, principal fuente de recarga de los acuíferos, configurando así el quimismo del agua de infiltración (*Ibíd.*) (Figura 51).

En la zona no saturada, durante el proceso de infiltración hasta alcanzar el nivel freático el quimismo del agua, sufre modificaciones radicales como consecuencia de las nuevas condiciones a que el agua está sometida. Entre ellas cabe citar la concentración por evapotranspiración, contacto con materiales de acusada capacidad de cesión de elementos solubles al agua al ser hidrolizados, capacidad del suelo para generar gran cantidad de ácidos, capacidad de la zona edáfica para consumir el oxígeno disuelto en el agua en la oxidación de la materia orgánica, intercambio de gases entre el aire del suelo y el aire exterior. Todos estos fenómenos modifican notablemente la composición del agua de lluvia que llega a adquirir en la zona edáfica y no saturada, su configuración casi definitiva (Custodio y Llamas, 1976).

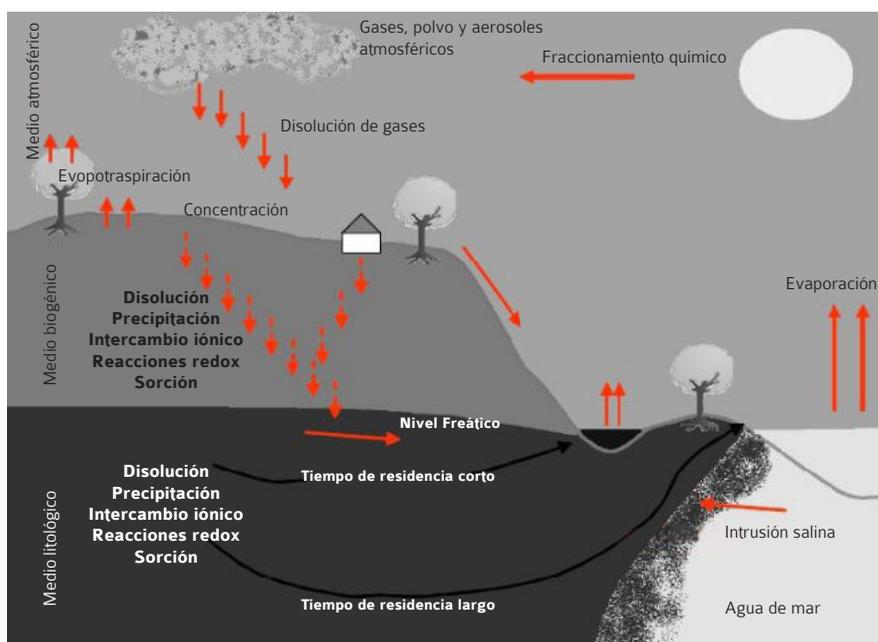


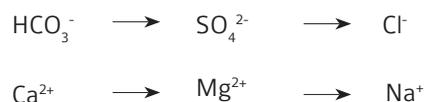
Figura 51. Procesos que determinan la composición del agua subterránea

Fuente: Tomado de Herczeg y Edmundo, 2001 citado por Betancur, 2008.

Una vez alcanzada la zona saturada el agua subterránea se incorpora al sistema de flujo propio de cada acuífero realizando recorridos muy variables en función de las características de cada uno de ellos. El conjunto de materiales por los que circula el agua y con los que interacciona constituye el tercer sistema en que el agua adquiere o modifica su quimismo. La composición de la roca, aunque muy importante en este sentido, no es determinante en la mineralización del agua subterránea. Pureza, textura, porosidad, grado de fisuración, estructura regional, así como presión, temperatura, tiempo de permanencia y de contacto agua-roca, secuencia en que el agua atraviesa determinados minerales, fenómenos modificadores, etc., pueden tener una influencia decisiva en la adquisición y evolución del quimismo (IGME, 1995).

En general, las aguas de circulación regional tienden a ir aumentando su mineralización hasta irse saturando. En primera aproximación, entre los aniones primero satura el Ion HCO_3^- , luego el SO_4^{2-} y el Cl^- . Para los cationes, el calcio se

satura primero, luego el magnesio y más difícilmente el sodio. Así, la evolución normal de un agua de circulación regional es que sucesivamente vayan dominando los siguientes iones (Custodio y Llamas, 2001):



Se supone que en el agua infiltrada dominan los iones bicarbonatos y calcio, lo cual no puede ser cierto y entonces puede empezarse la secuencia en un lugar más avanzado o sufrir un retroceso para luego tomar la evolución normal (*Ibíd*).

En la Tabla 11 se presentan la composición natural del agua subterránea de acuerdo al tipo de roca que la contiene.

Tabla 11. Implicaciones de la litología en la composición del agua subterránea

Tipo de roca	Composición del agua subterránea
Arenisca	Baja salinidad (300-500 mg/l) anión predominante: HCO_3^- catión predominante: Na^+ , Ca^{2+} Mg^{2+}
Caliza	Baja salinidad (500-800 mg/l) anión predominante: HCO_3^- catión predominante: Ca^{2+}
Dolomita	Baja salinidad (500-800 mg/l) anión predominante: HCO_3^- catión predominante: Ca^{2+} y Mg^{2+}
Granito	Muy baja salinidad (300 mg/l) anión predominante: HCO_3^- catión predominante: Na^+ , Ca^{2+}
Basalto	Baja salinidad (400 mg/l) anión predominante: HCO_3^- catión predominante: Ca^{2+} Mg^{2+} y Na^+
Esquisto	Baja salinidad (300 mg/l) anión predominante: HCO_3^- catión predominante: Ca^{2+} y Na^+
Marga	Mediana salinidad (1200 mg/l) anión predominante: HCO_3^- y Cl^- catión predominante: Ca^{2+} y Na^+
Yeso	Alta salinidad (2000-4000 mg/l) anión dominante: SO_4^{2-} catión dominante: Ca^{2+} seguido de Mg^{2+} o Na^+

Fuente: Modificado de Mazor, 2004.

Nota: El término salinidad lo utiliza el autor para referirse a la conductividad eléctrica.

La Tabla 12 constituye una validación de los resultados de los análisis fisicoquímicos. Así, el agua que se encuentra en un acuífero conformado por areniscas tendrá como iones predominantes los bicarbonatos, calcio, sodio y magnesio. En caso de que sean los cloruros los predominantes, se debe realizar un estudio para evaluar el origen de estos cloruros; actividad antrópica, rocas evaporíticas, acuíferos profundos.

De igual forma, Appelo y Postman (1993), citan que las concentraciones en cloruros en un agua subterránea a pH neutro y natural deberían variar entre 1,8 y 71,0 mg/l, siendo los más fuertes asociados a la presencia de rocas evaporíticas. De la misma manera, las concentraciones en nitratos, potasio y sodio no deberían superar los 12,4 mg/l, 7,8 mg/l y 46 mg/l, respectivamente. Para los sulfatos, los valores máximos pueden ser más elevados (480 mg/l), en caso de disolución del yeso (Campillo, 2012).

Los parámetros de mayor interés para la evaluación hidrogeoquímica y de la calidad son: pH, potencial redox, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, sólidos disueltos, cationes mayores (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), aniones mayores (Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} ,

NO₃), y algunos elementos traza (Si, Fe, Mn, B). De igual forma se tienen en cuenta parámetros microbiológicos, específicamente a la bacteria *Escherichia coli*.

Los valores medidos en el laboratorio no son absolutos, sino que son obtenidos con un cierto grado de incertidumbre (Mazor, 2004).

La incertidumbre es causada por el efecto combinado de varias fuentes de error; reproducibilidad, precisión, resolución y límite de detección. A ello se suman otros factores: la inestabilidad de la instrumentación, la contaminación, la precisión en la preparación de soluciones estándar, etc. La suma de todas las incertidumbres se llama el error analítico. El error analítico es un resultado acumulativo de todos los errores (*Ibíd.*). Si bien algunos autores utilizan el error analítico para validar los resultados de laboratorios, en la práctica se utiliza más comúnmente el error en el balance iónico. El balance iónico supone que la suma de cationes es igual a la suma de aniones en cada solución. La desviación de tal igualdad proporciona otra manera de evaluar la calidad de los datos (Custodio y Llamas, 2001). La ecuación utilizada es:

Balance iónico:

$$Error(\%) = \frac{(\sum \text{Cationes} - \sum \text{Aniones})}{(\sum \text{Cationes} + \sum \text{Aniones})} \times 100$$

Ecuación 30

Al comienzo de cada estudio se debe tomar la decisión sobre qué error es aceptable para continuar con el estudio. Un punto de corte en 2% o 5% es común. Los análisis con elevados errores en el balance iónico se omiten en el procesamiento de datos y, si es posible, se deben discutir con el personal del laboratorio (Mazor, 2004).

Según Custodio y Llamas (2001), el valor del porcentaje del error mínimo está en relación con la conductividad de la siguiente manera (Tabla 12).

Tabla 12. Error admisible del balance iónico en relación con la conductividad

Conductividad eléctrica (µc/cm)	50	200	500	2000	> 2000
Error aceptable (%)	±30	±10	±8	±4	±4

De acuerdo con esto, a medida que la conductividad eléctrica disminuye, el error aceptable en el balance iónico aumenta, debido a la dificultad de los límites de detección.

La gran variedad de componentes y características fisicoquímicas del agua natural exige su clasificación en grupos, para tener una información breve y sencilla sobre la composición química del agua de que se trate y de los aspectos de esta (IGME, 1995).

Los criterios que se utilizan para la clasificación geoquímica de las aguas son múltiples y a menudo complicados. En general suele nombrarse el agua por el anión o catión que sobrepasa el 50% de sus sumas respectivas. En caso de que ninguno supere el 50% se nombran los dos más abundantes. Si conviene se puede añadir el nombre de algún ión menor de interés y que esté en concentración anormalmente alta. Esta clasificación por iones dominantes se adapta bien a su representación en diagramas triangulares (Figura 52) o lineares (Figura 53) (*Ibíd.*)

La Figura 54 presenta una de las muchas relaciones que pueden establecer entre los cationes y aniones. Suelen ser útiles para representar diferentes tipos de agua, para establecer el intercambio iónico, determinar si el agua subterránea procede del agua de mar, entre otras. Así mismo, suelen utilizarse gráficas de comparación entre cationes vs. aniones.

El conocimiento de los efectos de cada uno de los elementos que contiene el agua o del conjunto de todos ellos permite establecer, mediante las normas de calidad (mencionadas en el capítulo de agua superficial) las posibilidades de utilización de un agua de composición definida en cada caso concreto.

“A nivel mundial, los acuíferos experimentan una creciente amenaza de contaminación ocasionada por la urbanización, el desarrollo industrial, las actividades agrícolas y la explotación minera (Figura 55). Por lo tanto, se requieren campañas proactivas y acciones prácticas que protejan la calidad original (generalmente excelente) del agua subterránea” (Foster & Mate, 2006).

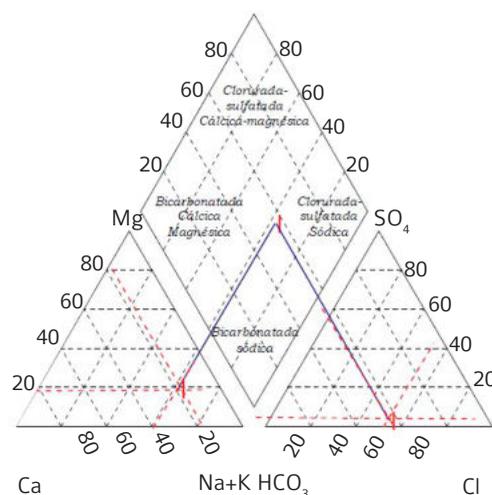


Figura 52. Diagrama de Piper para la clasificación de facies hidrogeoquímicas

Fuente: Betancur (2008).

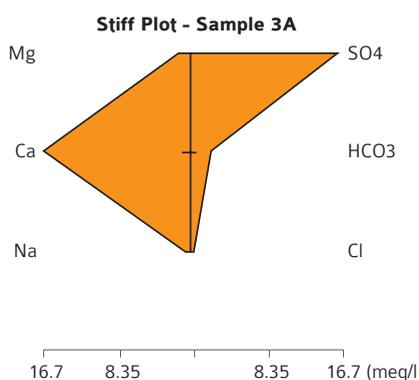


Figura 53. Diagrama de Stiff

Fuente: scientific software group, (1998).

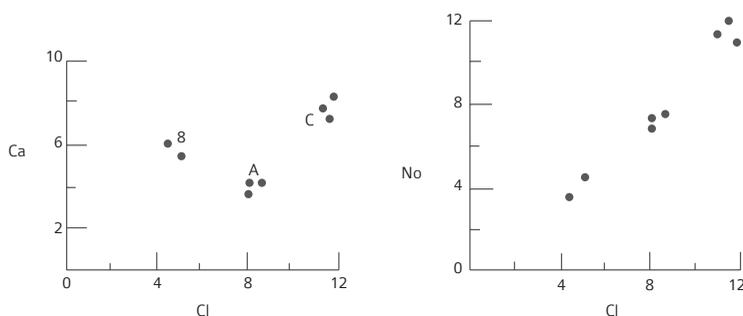


Figura 54. Relaciones iónicas entre cationes y aniones

Fuente: Mazor (2004).

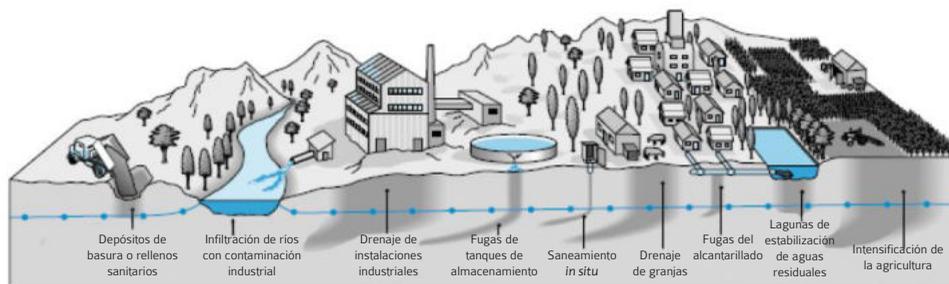


Figura 55. Usos del suelo que generan contaminación de acuíferos

Fuente: Foster et ál (2006).

La Tabla 13 da una idea de las actividades más comunes que pueden llegar a contaminar el agua subterránea. Es importante reconocer que estas difieren por mucho de las actividades y compuestos que más frecuentemente contaminan los cuerpos de agua superficial. Esto se debe a que la contaminación en el subsuelo depende de factores muy disímiles que controlan la movilidad y persistencia de los contaminantes, originados por la matriz del acuífero y las tasas mucho más lentas de biodegradación (como resultado de las bajas concentraciones de carbón orgánico, la reducida población de bacterias y la limitada difusión de

oxígeno). También es importante enfatizar que ciertas prácticas industriales y agrícolas (y procesos específicos que se magnifican dentro de dichas prácticas) a menudo presentan amenazas desproporcionadamente grandes a la calidad del agua subterránea. Por ello, medidas de control de contaminación atinadas y bien enfocadas y dosificadas pueden producir grandes beneficios con costos relativamente moderados (*Ibíd.*).

Tabla 13. Contaminantes y fuentes de contaminación.

Fuente de contaminación	Tipo de contaminante
Actividad agrícola	Nitratos, amonios, pesticidas, microorganismos fecales
Saneamiento in situ	Nitratos, microorganismos fecales, trazas de hidrocarburos sintéticos
Gasolineras y talleres automotrices	Benceno; otros hidrocarburos aromáticos; fenoles; algunos hidrocarburos halogenados
Depósitos final de residuos sólidos	Amonio, salinidad, algunos hidrocarburos halogenados; metales pesados
Industrias metalúrgicas	Tricloroetileno, tetracloroetileno; otros hidrocarburos halogenados, metales pesados, fenoles, cianuro
Talleres de pinturas y esmaltes	Alcalobencenos, tetracloroetileno, otros hidrocarburos halogenados, metales, algunos hidrocarburos aromáticos
Industria maderera	Pentaclorofenol; algunos hidrocarburos aromáticos
Tintorerías	Ticloroetilena, tetracloroetileno
Manufactura de pesticidas	Algunos hidrocarburos halogenados, fenoles, arsénico, metales pesados
Depósitos final de lodos residuales domésticos	Nitratos, varios hidrocarburos halogenados; plomo, zinc
Curtidurías	Cromo, salinidad, algunos hidrocarburos halogenados, fenoles
Exploración y extracción de petróleo/gas	Salinidad (cloruro de sodio), hidrocarburos aromáticos
Minas de carbón y de metales	Acidez, diversos metales pesados, hierro, sulfatos

Fuente: Foster et al (2006).

La anterior tabla presenta los contaminantes que pueden afectar la calidad del agua subterránea en sitios donde predominan las respectivas actividades. Sin embargo, y como se mencionó al inicio, primero se debe definir si la contaminación es de tipo natural, es decir, si obedece a un proceso fisicoquímico al interior de la roca. La determinación de estos compuestos se realiza en laboratorios acreditados y de acuerdo a las condiciones locales se debe evaluar si es necesario realizar análisis de estos en los laboratorios.

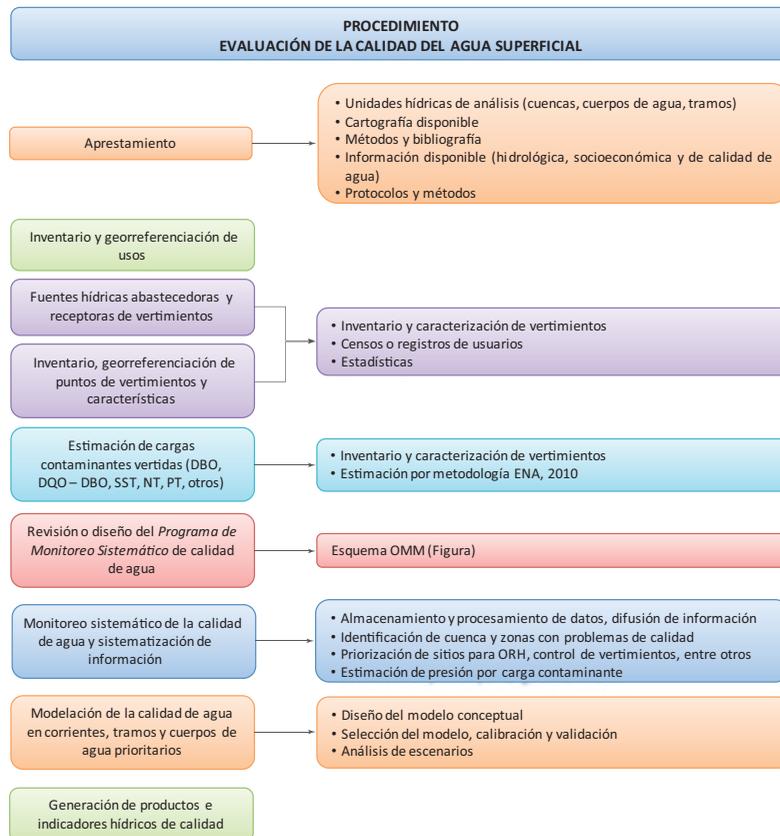
Generalmente, los iones mayores pueden dar información sobre una contaminación. Por ejemplo, en los sitios donde exista contaminación por fugas de alcantarillado, pozos sépticos mal diseñados, infiltración de lixiviados proveniente de disposición de basuras (rellenos sanitarios, botaderos a cielo abierto), es probable que se encuentren concentraciones de cloruros, sodio y potasio muy por encima de las normales, inclusive en un mapa se podría llegar a diferenciar los sitios contaminados de los no contaminados.

4.2. Marco metodológico para la evaluación de calidad del agua

Con base en los conceptos y modelo conceptual para la evaluación de la calidad de agua en las regiones, se presenta el procedimiento general para las ERA incluyendo las bases metodológicas generales para el cálculo de los indicadores de calidad, en relación con los criterios para la estimación para el cálculo de la carga contaminante, métodos, técnicas, protocolos y monitoreo tanto de la calidad de agua en las corrientes y cuerpos de agua, como de las características de los vertimientos. Se identifica igualmente la información requerida, fuentes y análisis de calidad, así como los principales instrumentos de referencia y las unidades de análisis.

4.2.1. Procedimiento para la evaluación de la calidad de agua superficial en la región

Un esquema general del proceso de evaluación de la calidad del agua se ilustra en la siguiente figura:



En este proceso, la identificación, georreferenciación y caracterización de las fuentes generadoras de contaminación son determinantes para evaluar las presiones sobre las condiciones de calidad de las corrientes y cuerpos de agua superficial. Estas presiones son también un insumo para el diseño del programa de monitoreo de la calidad de las aguas y de los indicadores representativos.

La carga contaminante está determinada por el tipo de actividades, atendiendo las particularidades regionales, a partir de la identificación de aquellos sectores, áreas y usuarios, lo mismo que los usos o situaciones de cambio de uso importantes. Si la carga contaminante se calcula a partir de las estadísticas socioeconómicas, como en el ENA, 2010, se sustrae la remoción alcanzada con los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

En el proceso de evaluación de la calidad del agua, la modelación surge como una opción metodológica para la estimación del estado actual del recurso bajo diferentes escenarios hidrológicos como para la proyección de escenarios de mejoramiento o reducción de la calidad hídrica en el tiempo y espacio.

Sin embargo, aunque modelando es que se adquiere conocimiento sobre un sistema, este ejercicio implica una estructuración y desarrollo técnico que traspasa el horizonte de formulación de las ERA, así como el escalonamiento definido para las mismas; su utilización tiene justificación en aquellos sistemas hídricos donde la presión ejercida hacia ellos requiera la adopción de medidas en términos de ordenamiento y reglamentación del recurso.

Por tanto, para efectos de las evaluaciones regionales del agua, podrá emplearse la modelación si está disponible, o recurrir a métodos que representen los fenómenos naturales a través de ecuaciones matemáticas y balances, para la utilización de resultados durante la construcción de los indicadores.

Al igual que en los demás componentes y en particular el de uso y demanda de agua, la evaluación regional de la calidad del agua debe considerar las circunstancias particulares de la jurisdicción en términos de información existente, y la capacidad de cada entidad. Sin embargo, las evaluaciones deben cumplir con un mínimo inicial bajo los siguientes criterios:

- Deben orientarse a cubrir el 100% del territorio de la jurisdicción mediante un proceso sistemático de planificación, gestión y generación de información.
- Hacer un análisis de la información y de las fuentes de información existentes y definir estrategias para mejorarla.
- Aplicar los protocolos existentes y los que reglamente el MADS junto con el IDEAM, que incluya aspectos como:
 - » Documentar el proceso metodológico.
 - » Utilizar técnicas universalmente aceptadas para levantar información donde haya vacíos, utilizando instrumentos de georreferenciación.

- » Realizar consultas a los sectores pertinentes para reconocer procesos productivos consumidores de agua y la opinión de expertos sobre el volumen de consumo en el sector.

4.2.2. Procedimiento para evaluación hidrogeoquímica y de calidad del agua subterránea

Como se mencionó en capítulos anteriores, la evaluación de la calidad del agua subterránea obedece a un proceso investigativo en el que se emplean los resultados de estudios previos a la hidrogeoquímica; estudios geológicos, hidráulicos e hidrodinámicos (Figura 57).

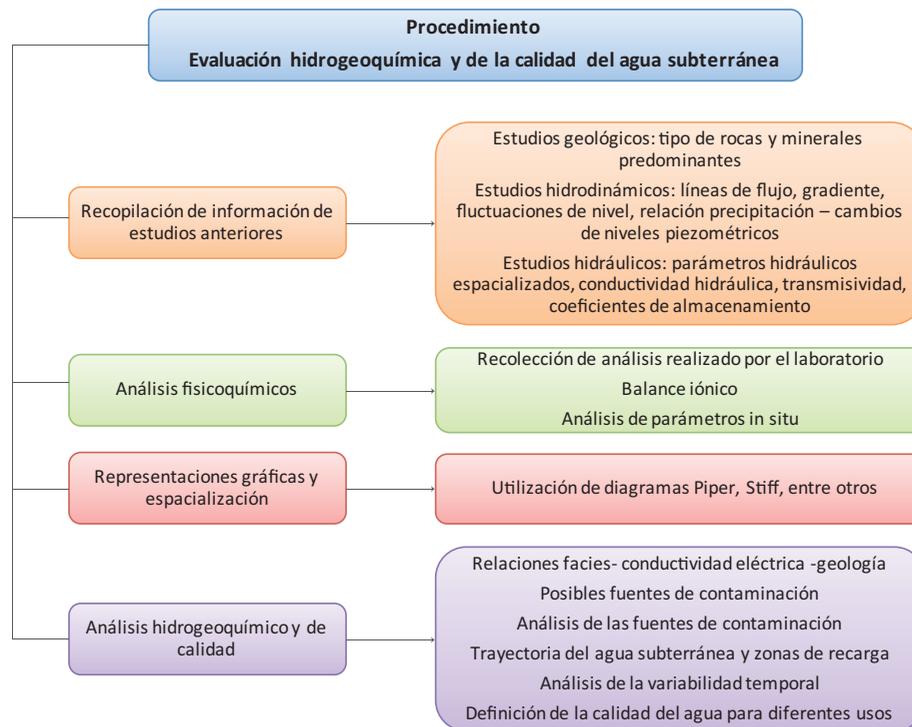


Figura 57. Procedimiento metodológico para la evaluación hidrogeoquímica y calidad de las aguas subterráneas

Los estudios geológicos permiten reconocer el tipo de roca y los minerales con los que reacciona el agua subterránea y así validar la información proveniente de los análisis de laboratorio. Con los estudios hidrodinámicos, se pueden establecer las líneas de flujo del agua subterránea. Estos trayectos podrán ser validados posteriormente por medio de las técnicas hidrogeoquímicas. Adicionalmente, se debe determinar las fluctuaciones del nivel piezométrico con respecto a los cambios de precipitación y realizar las interpretaciones respectivas.

es imprescindible calcular el error del balance iónico para cada una de las muestras y seleccionar aquellos que tengan errores dentro de los límites mencionados en el capítulo anterior. Es necesario resaltar que la red de monitoreo hidrogeoquímica deberá ser realizada teniendo en cuenta las condiciones específicas de la zona a evaluar. En el protocolo del agua se presentan algunos criterios a tener en cuenta a la hora de definir estas redes, sin embargo, es imprescindible tener en cuenta: líneas de flujo (trayectoria de las aguas subterráneas), sitios y actividades que podrían afectar eventualmente la calidad del agua subterráneas y, finalmente, los iones mayoritarios y elementos trazas en las rocas que caracterizan la geología regional y local.

Seguidamente se deben realizar estadísticas básicas con los parámetros in situ; pH, temperatura, conductividad eléctrica, potencial redox, oxígeno disuelto, sólidos disueltos. Se puede hacer uso del promedio de los datos, desviación estándar, valores máximos y mínimos.

Utilizando únicamente los análisis que tengan errores aceptables en el balance iónico, se pueden representar por medio de diagramas Piper, Schoeller, Stiff, la composición química de los estudios, facies físico-químicas. De esta manera se pueden clasificar y distinguir los diferentes tipos de agua presentes en un sistema acuífero (ver capítulo anterior). Adicionalmente, se tiene la posibilidad de espacializar los tipos de agua y parámetros físico-químicos (especialmente la conductividad eléctrica) en un mapa hidrogeológico. Esto es de mucha importancia en aquellas zonas donde hay uno o más acuíferos.

Luego de realizar los análisis anteriores, se definen relaciones entre la geología regional y el tipo de agua presente en los acuíferos junto con la conductividad. De acuerdo con la Tabla 1, los acuíferos correspondientes a depósitos de aluviones, por ejemplo, son de tipo bicarbonatado cálcico-magnésico y con conductividades relativamente bajas, mientras que los acuíferos que se encuentran en rocas evaporíticas, halita y yeso, se caracterizan por altas conductividades eléctricas y por contenidos predominantes de cloruros y sulfatos, respectivamente. Determinar si el tipo de agua (facies) corresponde al contexto geológico regional, es determinante, ya que a partir de esto se puede definir si el acuífero está contaminado o si existe una formación geológica que aún no se ha determinado.

En acuíferos libres con alta permeabilidad (depósitos aluviones) es muy común la incorporación de la contaminación antrópica por las diferentes actividades socio-económicas. Con técnicas como la hidrogeoquímica se pueden detectar estos procesos.

Adicionalmente, analizando la conductividad eléctrica y las facies, es posible validar las líneas de flujo resultantes de los modelos hidrodinámicos. Generalmente, se espera que a medida que aumenta o asciende la trayectoria de flujo, la mineralización del agua sea mayor y que aumente la conductividad. Asimismo, es factible identificar las zonas de recarga utilizando la hidrogeoquímica, puesto que en las zonas donde se recarga el agua, las aguas están menos mineralizadas, con

menores concentraciones en los iones y con menor conductividad, puesto que el tiempo de contacto con los minerales es menor.

Para el análisis de las zonas de recarga, flujos de agua subterránea, conexión entre acuíferos, relación aguas superficiales-aguas subterráneas, además de lo expuesto en el párrafo anterior, es posible utilizar los índices de saturación de la calicita, dolomita, entre otros, relaciones iónicas y análisis de temperatura, pH. Sin embargo, los resultados de estos pasos se pueden validar y mejorar utilizando técnicas isotópicas. Finalmente, es posible realizar el análisis de la variabilidad temporal de las aguas subterráneas. Generalmente se tienen datos de dos campañas fisicoquímicas al año; una en un mes de época seca y otra en un mes de época lluviosa. Se debe investigar qué tanto varían las aguas subterráneas.

En este punto se tiene un entendimiento más detallado acerca del comportamiento de las aguas subterráneas. En última instancia se determina, de acuerdo a las concentraciones de los elementos de interés sanitario los posibles usos del agua subterránea en base a la normatividad vigente. Es necesario entender que no se puede desligar la evaluación hidrogeoquímica de la calidad del agua. Como se puede observar en los procedimientos, una adecuada evaluación servirá de base para definir si se puede utilizar el agua subterránea para determinada actividad. De no ser de este modo, se puede correr el riesgo de gestionar y captar un agua con metales pesados por ejemplo, siendo esto perjudicial para la salud humana.

Así mismo, en aguas subterráneas "es necesario evaluar el peligro de contaminación del agua subterránea antes de poder definir en forma más clara las acciones necesarias para proteger su calidad, y tal evaluación debe convertirse en un componente esencial de las buenas prácticas ambientales. La definición lógica del peligro de contaminar el agua subterránea (Tabla 14) parte del análisis de la interacción entre la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación y la carga contaminante que es, será o pudiera ser aplicada al ambiente subsuperficial como resultado de la actividad humana que ocurre en la superficie del suelo. Al aplicar un esquema de esta naturaleza, se puede hallar una vulnerabilidad alta, pero sin peligro de contaminación, debido a la ausencia de una carga contaminante subsuperficial importante. Más aún, la carga contaminante se puede controlar o modificar, pero la vulnerabilidad de un acuífero no, ya que en esencia es determinada por las condiciones hidrogeológicas naturales" (*Ibíd.*).

Tabla 14. Definición de términos comunes relacionados con la contaminación del agua subterránea

TÉRMINO	DEFINICIÓN
Vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación	Sensibilidad a la contaminación, determinada por las características naturales intrínsecas de los estratos geológicos que forman los lechos confinantes suprayacentes o la zona no saturada del acuífero en cuestión
Peligro de contaminación del agua subterránea	Probabilidad de que el agua subterránea de un acuífero se contamine a concentraciones superiores a las marcadas en los lineamientos de la OMS para agua potable cuando una carga contaminante subsuperficial específica se genere en la superficie del terreno
Riesgo de contaminación del agua subterránea	Amenaza a la salud humana por la contaminación de una fuente específica de suministro de agua subterránea, o amenaza a un ecosistema por la contaminación de una descarga natural específica de un acuífero

Fuente: (Ibíd.).

“La vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación es, en forma práctica, lo inverso de lo que en la jerga de la gestión de calidad del agua de ríos se conoce como ‘la capacidad de asimilación de contaminantes por un cuerpo receptor’. Se puede evaluar a partir de las características hidrogeológicas de la zona no saturada o de las capas confinantes suprayacentes. La definición de índices para cada una de estas características (Figura 58) permite construir un índice general de vulnerabilidad que se puede representar con facilidad en un mapa. La superposición de este mapa con otro con los resultados de los levantamientos en campo de la carga potencial contaminante sub-superficial facilita la evaluación del peligro de contaminar el agua subterránea” (Ibíd).

“La posibilidad de que este peligro se convierta en una amenaza real a una fuente de abastecimiento público depende, en primer lugar, de su ubicación con respecto a las fuentes de agua subterránea (y de la dirección del flujo y zona de captación) y, en segundo lugar, de la movilidad del contaminante (o contaminantes) en cuestión dentro del régimen local del flujo de agua subterránea. Normalmente se deben definir varias áreas y zonas (Figura 59), utilizando los datos hidrogeológicos sobre el régimen local del flujo de agua subterránea. Hay varios modelos analíticos y numéricos para facilitar su delineación. La escala a la cual se realicen las mediciones, trazados y análisis de los diversos componentes necesarios para evaluar el peligro de contaminación del agua subterránea variará de acuerdo con el enfoque principal del trabajo, ya sea la protección de la fuente de abastecimiento de agua o la protección del recurso acuífero” (Ibíd).

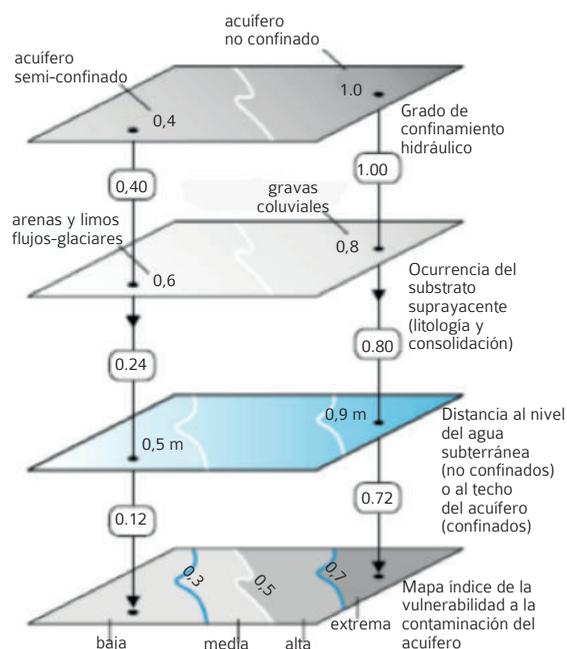


Figura 58. Generación de un mapa de vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero, utilizando la metodología GOD, con base en las características hidrogeológicas de la zona no saturada o de las capas confinantes suprayacentes

Fuente: (Ibid.).

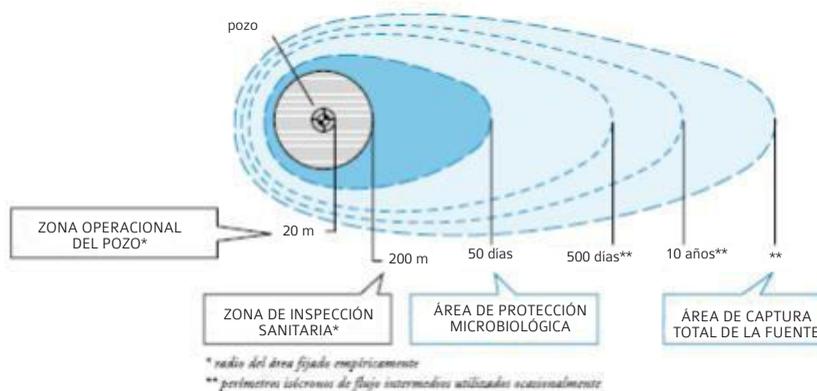


Figura 59. Perímetros de protección de pozos

Fuente: (Ibid.).

“Para proteger los acuíferos contra la contaminación es esencial controlar las prácticas de uso del suelo, las descargas de efluentes y el depósito final de residuos; sin embargo, es necesario definir estrategias pragmáticas que permitan equilibrar diversos intereses que compiten entre sí. Así, en vez de aplicar controles universales sobre uso del suelo y descarga de efluentes, es más eficaz por el mismo costo (*cost-effective*), y menos perjudicial al desarrollo económico, utilizar la capacidad natural de atenuación de contaminantes de los estratos suprayacentes al acuífero, cuando la capacidad de control sea la que se necesita para proteger la calidad del agua subterránea.

Es necesario establecer zonas simples y sólidamente definidas (basadas en perímetros de vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación y de protección de fuentes), con matrices que muestren dónde es posible realizar qué actividades, con un riesgo aceptable para el agua subterránea. La zonificación para la protección del agua subterránea también juega un papel clave al establecer prioridades para el monitoreo de su calidad, premisas para realizar auditorías ambientales en industrias, acciones de control de contaminación dentro de un sistema agrícola y limpieza de terrenos históricamente contaminados, así como para educación pública en general. Todas estas actividades son componentes esenciales de una estrategia sustentable para la protección de la calidad del agua subterránea. Es necesario lograr un equilibrio razonable entre la protección de los recursos de agua subterránea (los acuíferos en conjunto) y la protección de fuentes específicas (pozos y manantiales).

Aunque ambos enfoques son complementarios, el hecho de que se enfatice uno u otro (en una zona específica) dependerá de la situación de explotación de los recursos y de las condiciones hidrogeológicas que prevalezcan. Si el uso para consumo humano sólo comprende una parte reducida del recurso de agua subterránea disponible, quizá no resulte eficaz por el mismo costo proteger todas las partes de un acuífero por igual. Entonces, será más apropiado establecer estrategias orientadas a las fuentes, y trabajar a escalas de 1:25.000 a 1:100.000, y delinear zonas de protección (de captación) para las fuentes de agua subterránea y perímetros isócronos de flujo, evaluar la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación y las cargas de contaminantes subsuperficiales en las áreas así definidas. Este enfoque es más propicio para acuíferos relativamente uniformes y no consolidados, explotados solo por medio de un pequeño número de pozos municipales de suministro de agua que sean muy productivos y con regímenes estables de bombeo.

No se puede aplicar tan fácilmente en acuíferos con un gran número de extracciones individuales en rápido crecimiento ya que no es práctico considerar las fuentes individuales y establecer áreas fijas. Las estrategias dirigidas a los acuíferos se pueden aplicar de una forma más general, ya que se orientan a lograr un cierto grado de protección para todo el recurso de agua subterránea y para todos sus usuarios. Implican el mapeo de la vulnerabilidad a la contaminación en áreas más extensas (que incluyen uno o más acuíferos importantes), y requieren trabajar a escala de 1:100.000 o superior si el interés se limita a efectos de información y planificación general. Dicho mapeo vendría seguido normalmente por un inventario de la carga de contaminantes subsuperficiales a escala más detallada para cubrir, por lo menos, las áreas más vulnerables (*Ibíd.*).

4.2.3. Métodos y técnicas

Comprende el conjunto de acciones que se desarrollan para medir y analizar las condiciones de calidad de agua en las corrientes, cuerpos de agua superficial y subterránea y las características de los vertimientos provenientes de las diferentes actividades productivas.

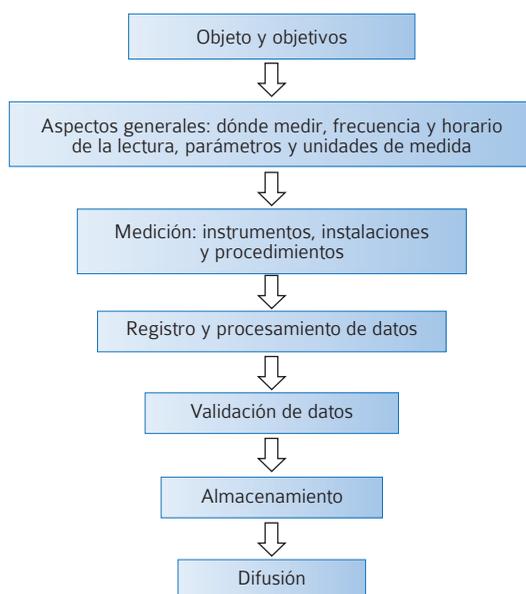
Las actividades que se desarrollen para conocer y evaluar el estado de calidad del agua en los cuerpos hídricos deben estar vinculadas a programas de calidad del agua que permitan articular la información disponible para hacer seguimiento a su evolución, identificar y seleccionar las medidas para su mejoramiento y evaluar el efecto de las medidas aplicadas.

Estos programas tienen dos componentes determinantes, uno es el monitoreo y el otro la modelación de la calidad del agua, los cuales serán desarrollados a continuación. Se relacionan guías de métodos, procedimientos y técnicas que sirven de referencia mientras el MADS los reglamenta.

Monitoreo, protocolos y procedimientos de calidad del agua

En el marco del Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico, el MAVDT (ahora MADS), en coordinación con el IDEAM, adelanta el componente de Protocolos y Procedimientos para la Calidad del Agua. Estos protocolos se elaboran con base en una revisión y complementación de los documentos desarrollados por el IDEAM, en especial los instructivos y protocolos de muestreo y análisis de laboratorio de calidad ambiental, así como de los de INVEMAR relativos a la Red de Vigilancia de la Calidad de las Aguas Marinas y Costeras (REDCAM). Igualmente, tienen como referente recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial, en especial los contenidos en la Guía de Prácticas Hidrológicas de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2008).

Los protocolos propuestos en el marco del Programa Nacional de Monitoreo tienen como estructura básica la presentada en la Figura 60:



En todos los casos, los protocolos encierran los elementos metodológicos básicos para montar una estación de monitoreo, medir un determinado parámetro, procesar los datos, validarlos, almacenarlos y difundirlos, y están orientados principalmente a entidades sin o con poca experiencia en el tema. Para procedimientos más detallados, los protocolos orientan al usuario a manuales más especializados, tanto del IDEAM como de la literatura especializada a nivel mundial como la OMM, USGS, EPA y otros (*Ibíd.*).

Los protocolos de monitoreo y seguimiento del agua constituyen la base alrededor de la cual las distintas entidades que ejecutan monitoreo de la calidad del agua homologuen o unifiquen sus procedimientos básicos para la generación de información sobre el estado del recurso hídrico y para manejo del usuario general que requiere conocer los niveles de contaminación del agua, así como las concentraciones promedias, máximas y mínimas para diferentes parámetros y períodos de observación.

La OMM en la actualización de la Guía de prácticas hidrológicas, capítulo 7, le dio particular relevancia a profundizar en el capítulo de Calidad de agua y ecosistemas acuáticos (WMO, 2008).

En esta guía se hace referencia a que existen muchos métodos para el monitoreo de la calidad del agua. Métodos que en gran medida están ligados al diseño de la red de estaciones de monitoreo de largo plazo e investigaciones de corto plazo, o a una combinación de las dos que es lo más común. La localización de las estaciones de muestreo, y la frecuencia del muestreo, dependen de los objetivos de la red, la importancia del punto de monitoreo, el valor al nivel de la medida, la variabilidad espacial de los parámetros considerados en el muestreo y la disponibilidad de recursos. Se hace énfasis en la importancia del diseño de la red en función de los objetivos de calidad o estándares y de los usos actuales. Plantea los pasos generales para el diseño de estos sitios de muestreo, los cuales se ilustran en la Figura 61:

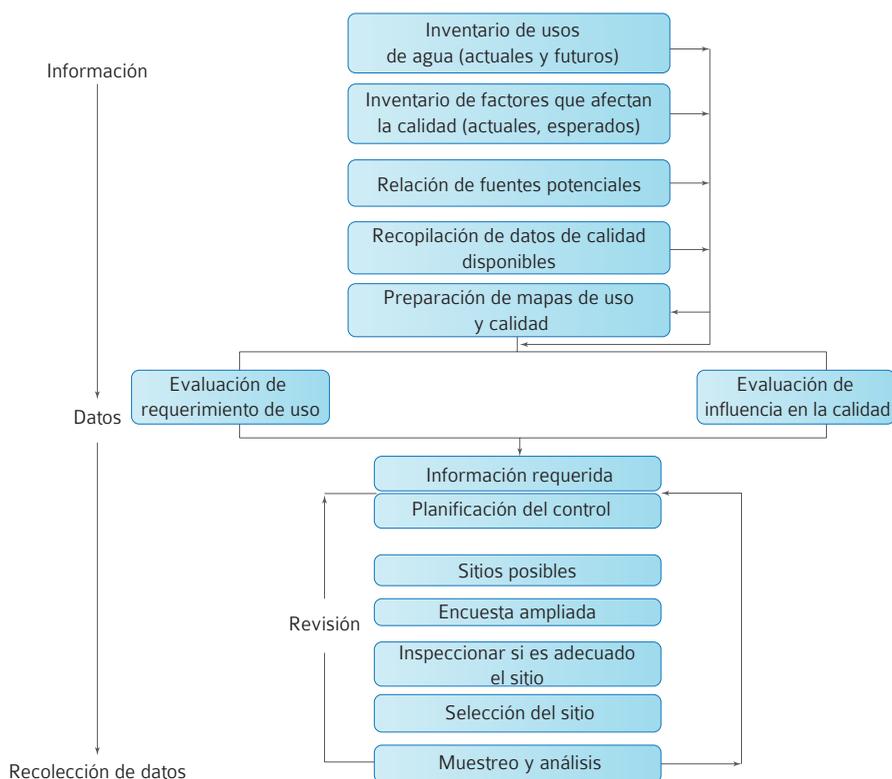


Figura 61. Pasos a seguir para seleccionar los sitios de muestreo

Fuente: Traducido de Guide to Hydrological Practices (WMO, 2008).

Este mismo capítulo de la guía (WMO, 2008) incluye criterios para la selección de sitios de muestreo y los protocolos para agua superficial, precipitación, agua subterránea y sedimentos. Además, los métodos y técnicas para la toma de muestras por cada uno de los parámetros.

La guía y el protocolo de seguimiento del agua del IDEAM pueden consultarse en la página web del IDEAM.

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, de acuerdo con el artículo 34 del Decreto 3930 de 2010 expedirá el Protocolo para el Monitoreo de los Vertimientos en Aguas Superficiales y Subterráneas, en el cual se establecerán, entre otros aspectos, el punto de control, la infraestructura técnica mínima requerida, la metodología para la toma de muestras y los métodos de análisis para los parámetros a determinar en vertimientos y en los cuerpos de agua o sistemas receptores.

En el parágrafo de este artículo se plantea que mientras el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial adopta el Protocolo para el Monitoreo de los Vertimientos en Aguas Superficiales y Subterráneas, se seguirán los procedimientos establecidos en la Guía para el Monitoreo de Vertimientos, Aguas Superficiales y Subterráneas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2002b).

Modelación de la calidad del agua superficial

Una visión regional del estado de calidad del agua en cuerpos de agua superficiales requiere métodos que permitan espacializar los datos obtenidos en puntos de monitoreo de calidad y calcular la capacidad de asimilación de los cuerpos de agua. La modelación de la calidad del agua es una técnica de análisis para reproducir una serie de eventos a través del manejo de las expresiones matemáticas que representan los diferentes componentes de la calidad del agua a estudiar.

Algunas aplicaciones de los resultados de la modelación de transporte y de calidad del agua para la gestión del recurso hídrico son las siguientes:

- **Análisis de situación actual con datos históricos:**
 - » Balances de masa de contaminantes
 - » Identificación de fuentes de contaminación
 - » Evaluación de la capacidad asimilativa del cuerpo de agua
 - » Estudios estadísticos de exposición de la población a sustancias tóxicas
 - » Interpretación de datos de monitoreo de calidad del agua
 - » Verificación del cumplimiento de los objetivos de calidad a lo largo de las corrientes
 - » Identificación de la localización, extensión y magnitud de los incumplimientos
 - » Identificación de los vertimientos que ocasionan mayores impactos.

- **Predicción**
 - » Seguimiento a actividades de control de contaminación
 - » Análisis comparativo de escenarios de manejo y del efecto de diferentes tecnologías de tratamiento de agua residual
 - » Definición de metas de reducción de cargas contaminantes de aquellos parámetros que no cumplan los criterios de calidad para los usos asignados
 - » Definición de límites de vertimientos
 - » Evaluación del impacto de vertimientos específicos.

Los modelos de calidad del agua suelen incorporar un módulo cuantitativo que simula los caudales resultantes de la precipitación de lluvia, y un módulo de calidad del agua que simula la variación de la calidad del agua expresada mediante parámetros tales como DBO, nitrógeno y fósforo. El módulo de calidad del agua consta, por lo general, de las siguientes etapas: Evaluación de la carga de contaminación, transporte, retención y control de contaminantes.

Para modelar la calidad del agua de una corriente es necesario simular los procesos de transformación de los diferentes compuestos que son vertidos a su cauce. Es decir que se deben simular el transporte y la degradación o transformación de los componentes de la calidad del agua. Estos procesos dependen del caudal, la

velocidad, el área transversal y el radio hidráulico, características que se deben tomar de la modelación hidráulica del río (CVC, Universidad del Valle, s.f.).

Los modelos matemáticos de calidad del agua se utilizan para conocer los cambios resultantes en la calidad de los cuerpos de agua como respuesta a las cargas de los vertimientos, basados en el comportamiento de los contaminantes en el agua, es decir, en los cambios de sus concentraciones en el tiempo y en el espacio, los cuales dependen de las características específicas de los cuerpos hídricos y de la interacción de las sustancias contaminantes con otras sustancias presentes en el agua. Adicionalmente, los modelos son necesarios para predecir condiciones de calidad del agua en situaciones críticas o potenciales.

Estos procesos de transformación que reducen las concentraciones después del sitio de vertimiento y en algunos casos las cargas, son los que constituyen la capacidad de asimilación de los cuerpos de agua. El primero de ellos es la dilución que es función del caudal en las corrientes o el volumen en los cuerpos de agua lénticos que tiene efectos sobre todas las sustancias; la concentración de las sustancias conservativas es afectada solamente por los procesos de transporte, mientras que las sustancias no conservativas son modificadas tanto por los procesos de transporte como por reacciones bioquímicas, interacciones del material del cauce con la columna de agua o decaimiento por muerte, en el caso de los microorganismos.

Dentro de los aspectos mínimos para el Ordenamiento del Recurso Hídrico que aborda la normatividad ambiental del país (artículo 6 del Decreto 3930 de 2010), la autoridad ambiental competente debe incluir la aplicación y calibración de modelos de simulación de la calidad del agua, que permitan determinar la capacidad asimilativa de sustancias biodegradables o acumulativas y la capacidad de dilución de sustancias no biodegradables y/o utilización de índices de calidad del agua, de acuerdo con la información disponible.

La identificación de los usos existentes o potenciales, debe hacerse teniendo en cuenta las características físicas, químicas, biológicas, su entorno geográfico, cualidades escénicas y paisajísticas, las actividades económicas y las normas de calidad necesarias para la protección de flora y fauna acuática (parágrafo 1, artículo 6, Decreto 3930 de 2010).

La modelación es una herramienta fundamental en el proceso de planificación y administración de los recursos hídricos. Se fundamenta en una evaluación de la calidad y comportamiento hidrológico de los cuerpos de agua y a partir de allí, simular condiciones deseadas en términos de capacidad de carga, así como la capacidad de dilución.

Sobre los modelos de simulación de la calidad del recurso hídrico, el parágrafo 1 del artículo 7 del Decreto 3930 establece que “mientras el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial expide la Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico, las autoridades ambientales competentes podrán seguir

aplicando los modelos de simulación existentes que permitan determinar la capacidad asimilativa de sustancias biodegradables o acumulativas y la capacidad de dilución de sustancias no biodegradables, utilizando, por lo menos, los siguientes parámetros:

- DBO_5 : demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco (5) días
- DQO: demanda Química de Oxígeno
- SS: sólidos suspendidos
- pH: potencial del ión hidronio, H^+
- T: temperatura
- OD: oxígeno disuelto
- Q: caudal
- Datos hidrobiológicos
- Coliformes totales y coliformes fecales”.

El MADS se encuentra en proceso de elaboración de las siguientes guías:

- Guía de modelación de aguas superficiales,
- Guía de modelación de aguas subterráneas,
- Guía de modelación de aguas marinas.

Estas guías son una herramienta básica para los procesos de establecimiento de metas de reducción de cargas contaminantes. A partir de la utilización acertada de modelos soportados en una buena información de monitoreo e hidrología de la zona correspondiente al cuerpo de agua en estudio, es posible proyectar y establecer los niveles de referencia para determinar los límites de cargas que pueden ser vertidas al tramo o cuerpos de agua en los procesos de ordenación del recurso hídrico.

4.2.4. Información y unidades de análisis

Información disponible

La Red Básica de Calidad del agua operada por el IDEAM consta de 154 puntos, los cuales son monitoreados de 2 a 4 veces por año, de manera que se refleje el comportamiento hidrológico del cauce. En caso de estaciones ubicadas en regiones con regímenes bimodales, lo deseable es que se realice monitoreo en los dos períodos de aguas bajas para encontrar el estado más crítico, y en los dos períodos de aguas altas. Si se trata de áreas con regímenes monomodales se debe monitorear en la época seca y también durante la época lluviosa. El objetivo de la Red Básica de Calidad del agua es evaluar el estado, la degradación y/o recuperación del recurso hídrico, mediante el monitoreo sistemático en estaciones representativas de la actividad económica del país y la realización de análisis fisicoquímicos que indiquen afectación por vertimientos domésticos, industriales, actividad agrícola y minería.

Los parámetros de calidad incluyen parámetros medidos *in situ* (temperatura, CE, pH y OD), SST, turbiedad, DQO, nutrientes (NO₃, NO₂, NH₃, PO₄, nitrógeno total, fósforo total), sulfatos, metales pesados en agua y en sedimentos y plaguicidas (organoclorados, organofosforados y triazínicos). Los parámetros que se miden en cada estación dependen del tipo de actividades económicas que se desarrollen en las áreas de drenaje de los cauces monitoreados.

La red básica debe estar complementada por redes regionales que permitan a las autoridades ambientales ejercer sus funciones de evaluación, control y seguimiento ambiental de los usos del agua mediante la identificación de las condiciones de calidad que pueden ser afectadas por vertimientos de residuos. Estas redes deben tener mayor resolución temporal y espacial que la red nacional.

Unidades de análisis; resolución espacial y temporal

La evaluación del estado de calidad del agua se realiza en cuerpos de agua o en parte de ellos. Por medio de los muestreos y análisis de parámetros físico-químicos y biológicos se evalúa la calidad en los sitios y momentos específicos donde se realizan; si el muestreo es sistemático y frecuente, es decir, si se realiza monitoreo, se puede conocer la variación temporal de la calidad en los sitios monitoreados, mientras que para conocer la calidad en un dominio continuo, estimar las variaciones estacionales o para estimar el comportamiento frente a escenarios de manejo se utiliza la modelación de la calidad del agua.

Los vertimientos puntuales se consideran como entradas de sustancias potencialmente contaminantes a los cuerpos de agua, mientras que cuando se analizan las fuentes difusas, se amplía el área de estudio a la cuenca hidrográfica de la cual se consideran los usos del suelo predominantes, el régimen de precipitación, la topografía y otros factores que influyen en el transporte de contaminantes por la escorrentía.

Para evaluar la presión ejercida por los aportes de contaminación, la unidad espacial de análisis, corresponde al área geográfica de los cuerpos receptores de vertimientos de aguas residuales domésticas (de las principales cabeceras municipales y centros poblados de la región) y de las aguas residuales generadas por las diferentes actividades productivas de la zona de interés. Los indicadores pueden ser implementados en una diversa gama de dominios espaciales, desde el tramo de un río, a una cuenca, a una región hidrológica e incluso al territorio de una región.

La calidad del agua varía relativamente rápido en el espacio y en el tiempo. Espacialmente es modificada por la localización de los vertimientos y los procesos de asimilación de los contaminantes, así como por los flujos de los afluentes. Temporalmente depende de las variaciones de los caudales de las corrientes, de la dinámica de los vertimientos y de la hora del día de la cual dependen la temperatura y la radiación, las cuales definen las tasas de los procesos biológicos de degradación

de la materia orgánica y los ciclos de nutrientes. Por esto, las escalas temporal y espacial de los estudios de calidad del agua deben definirse de acuerdo con los objetivos de los mismos.

4.2.5. Modelamiento espacial para la calidad de agua

La información requerida para la espacialización del componente de condiciones de calidad de agua corresponde a datos puntuales, como son las estaciones de monitoreo y los puntos de vertimientos y a datos lineales correspondientes a los tramos de la red hídrica que tienen definidos objetivos de calidad. Estos insumos se pueden obtener del SIRH.

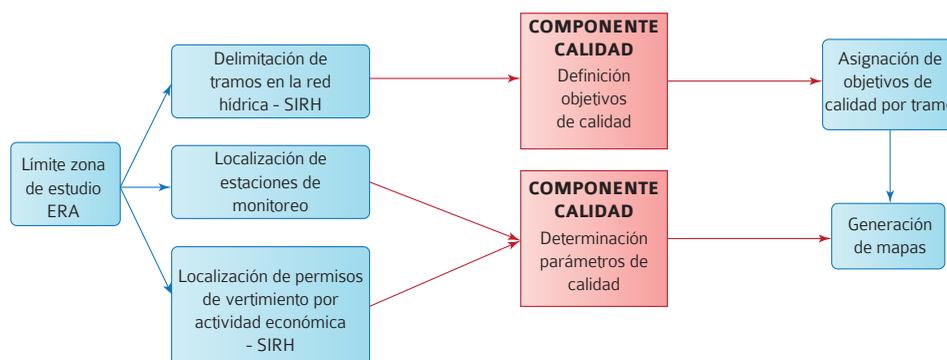


Figura 62. Procedimiento espacialización de la calidad del agua

Esta información del componente de calidad es vectorial, por tanto no requiere mayor procesamiento para su espacialización. Lo que se hace es asociar a las estaciones de monitoreo los diferentes parámetros de calidad calculados, como son: DBO, DQO, SST, pH, entre otros.





Capítulo 5

Componente de riesgos en la Evaluación Regional del Agua

Los lineamientos del ERA aportan a los análisis básicos de amenazas y vulnerabilidades del sistema hídrico natural y del recurso hídrico, algunos de ellos se expresan en indicadores y otros se evalúan en el marco del análisis integrado de esta. El avance del conocimiento de amenazas y vulnerabilidad permitirá la construcción de nuevos indicadores de este componente.

El componente de riesgo en las Evaluaciones Regionales del Agua (ERA) tiene como objetivo evaluar la situación actual y tendencias de: a) las amenazas y vulnerabilidades del sistema hídrico natural, b) la vulnerabilidad del recurso hídrico al desabastecimiento y a la disponibilidad por calidad, y c) las amenazas a la población por efecto de la dinámica de las aguas superficiales.

5.1. Marco conceptual

Los riesgos, desde lo ambiental, consideran en primera instancia que la afectación de los procesos naturales constituye una amenaza para las dinámicas que generan, soportan y regulan la vida, y cuyos efectos dependen de la fragilidad de los ecosistemas ante estos y de la persistencia o frecuencia con que se presentan; y en segunda instancia, que los recursos naturales son limitados y puede verse afectado su aprovechamiento por los seres humanos por efectos de la fluctuación de la oferta o la disminución total de esta, una alta demanda que genera agotamiento, un inadecuado uso y aprovechamiento que deteriora la calidad y por lo tanto su disponibilidad.

En tal sentido, los riesgos de los sistemas hídricos contemplan las afectaciones al ciclo de agua por los efectos de la variabilidad climática y las actividades humanas sobre estos; en especial, aquellos eventos que disminuyen el caudal superficial y la recarga de acuíferos, desregulan el comportamiento natural de los caudales, disminuyen la capacidad de asimilación y aquellos que reducen o amplían la dinámica de las aguas superficiales sobre el territorio. De igual manera, examina los efectos anteriores sobre la oferta, demanda, calidad y disponibilidad para el aprovechamiento del recurso y la presión e impactos de estos sobre el sistema hídrico.

Los riesgos de los sistemas hídricos naturales y los asociados con el recurso hídrico hacen parte de lo que se denomina como **riesgo ecológico**, que se define como los daños y pérdidas potenciales que pueden presentarse en los ecosistemas y sus servicios, debido a eventos físicos peligrosos de origen natural, socionatural, tecnológico, biosanitario o humano no intencional, en un período de tiempo específico, determinados por la vulnerabilidad de los ecosistemas expuestos. (MADS - Grupo de Investigación en Gestión de Agroecosistemas Tropicales Andinos, Universidad Tecnológica de Pereira, 2013).

5.1.1. Conceptos básicos

Amenaza

En este contexto, se entiende por *amenaza* a los sistemas hídricos naturales y su aprovechamiento en la ERA, a la probabilidad de que se presenten eventos de origen natural o antrópico que puedan afectar de manera total o parcial, temporal o definitiva, los procesos naturales del agua y su aprovechamiento por el ser humano.

Vulnerabilidad

- *La vulnerabilidad del sistema hídrico* se define como la susceptibilidad de estos a la disminución de los caudales, la recarga de acuíferos, la capacidad de regulación hídrica y de depuración, la cual se encuentra determinada por las características intrínsecas de los sistemas hídricos y el nivel o grado de exposición a eventos naturales o antrópicos.
- Se entiende como *vulnerabilidad intrínseca* a las características o naturaleza de los sistemas hídricos que determinan el grado como se afectarían por eventos externos.
- *La vulnerabilidad del recurso hídrico* se define como la susceptibilidad a presentarse desabastecimiento por la disminución de la oferta o por limitación de disponibilidad al uso por efectos de la contaminación. Está determinada por las condiciones naturales que regulan la oferta y la capacidad natural de asimilación en relación con las necesidades de la demanda y uso del recurso.

Riesgo

- El análisis de *los riesgos de los sistemas hídricos* analiza qué tan probable es que se presenten daños y pérdidas en estos sistemas, que puedan afectar de manera total o parcial los procesos naturales del ciclo del agua debido a la ocurrencia de eventos amenazantes
- El análisis de *los riesgos del recurso hídrico* analiza qué tan probable es que se presenten afectaciones en el uso y aprovechamiento de este por una inadecuada relación entre la demanda y la oferta del sistema hídrico.

5.1.2. Modelo conceptual de amenazas y vulnerabilidades del sistema hídrico natural

Los análisis de amenazas y vulnerabilidades del sistema hídrico se soporta en el conocimiento sobre el comportamiento de este; en razón a ello se estiman los aspectos principales que determinan los regímenes hidrológicos e hidrogeológicos de las aguas superficiales y subterráneas, y los efectos de los seres humanos y los fenómenos climáticos (variabilidad climática y eventos extremos) sobre estos. En la Figura 63 se ilustra el modelo conceptual de amenazas y vulnerabilidades del sistema hídrico.

A continuación se exponen los criterios que hacen parte del modelo de amenazas y vulnerabilidad de los sistemas hídricos.

- Para los **análisis de las amenazas al sistema hídrico** se debe contemplar lo siguiente:
 - » Disminución de la oferta hídrica natural como consecuencia de la variabilidad y cambio climático.
 - » Disminución de la capacidad de los sistemas hídricos para retener y regular los caudales dada la pérdida de los ecosistemas reguladores (páramos, humedales) por la ocurrencia de incendios, movimientos en masa y erosión, y por actividades sectoriales como la minería, la agricultura y la ganadería.

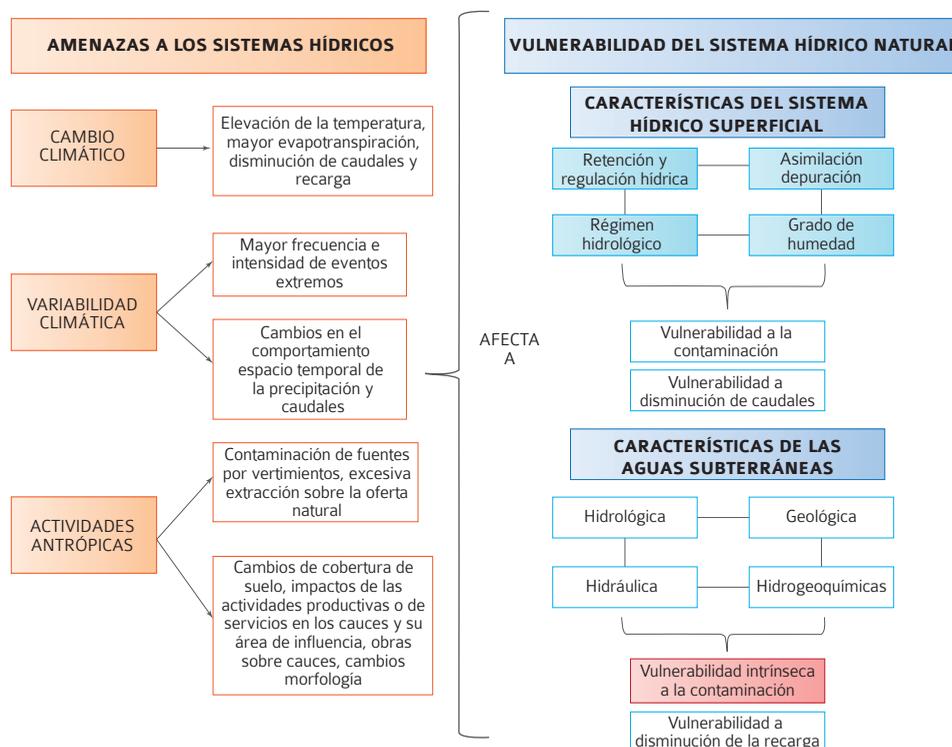


Figura 63. Modelo conceptual de análisis de amenazas y vulnerabilidades del sistema hídrico natural

- Para la **vulnerabilidad intrínseca a la contaminación** de fuentes superficiales y subterráneas debe analizar:
 - » Las características propias de un acuífero que determinan su sensibilidad a ser afectado por contaminación derivada de actividades antrópicas o fenómenos naturales (vulnerabilidad intrínseca de acuíferos).
 - » Las características propias de un sistema hídrico natural que determinan su capacidad para degradar sustancias, elementos o formas de energía provenientes de procesos naturales o antrópicos.

5.1.3. Modelo conceptual para evaluar la vulnerabilidad del recurso hídrico

En la Figura 64, se indica el modelo conceptual para evaluar la vulnerabilidad del recurso hídrico, que corresponde al segundo objetivo del componente de riesgos en la ERA, en donde la vulnerabilidad del recurso hídrico se relaciona con las características de las condiciones naturales y el tipo de uso y aprovechamiento del mismo, tanto para el análisis de la vulnerabilidad al desabastecimiento como a la vulnerabilidad a la disponibilidad por calidad. En tal sentido se deben tener en cuenta los siguientes criterios de análisis para la vulnerabilidad del recurso hídrico.

- La **vulnerabilidad al desabastecimiento del agua** se asocia a la relación entre la variabilidad de la oferta disponible del recurso y la demanda de este para las actividades humanas. Se deben contemplar los siguientes escenarios para el análisis:
 - » Cuando existe una demanda superior o igual a una oferta disponible con comportamiento estable y permanente, lo cual puede presionar el recurso hídrico y configurar un agotamiento del mismo.
 - » Cuando la oferta natural presenta alteraciones importantes por cambios climáticos y las actividades humanas, disminuyendo la oferta disponible del recurso y desequilibrando la relación oferta-demanda de manera permanente.
 - » Cuando el comportamiento natural de los regímenes hidrológico e hidrogeológico presenta fluctuaciones temporales que no están acordes a una demanda más constante en la unidad de tiempo de análisis, lo cual lleva a un desabastecimiento en periodos determinados.
- La **vulnerabilidad a la disponibilidad del agua** se asocia a la relación entre las características fisicoquímicas del agua y las condiciones de calidad requeridas para los diferentes usos, como el acceso a esta por efectos de problemas en la captación. Se deben contemplar los siguientes escenarios para el análisis:
 - » Cuando los flujos procedentes de los eventos torrenciales e inundaciones cambian sustancialmente la calidad de las aguas por efectos de materiales sólidos y líquidos que la contaminan en un alto grado.

- » Aportes de gran cantidad de sólidos procedentes de movimientos en masa y de erosión que se desarrollan en las áreas de influencia del cauce.
- » Cuando las cargas contaminantes vertidas a lo largo del cauce superan la capacidad de asimilación y depuración de los regímenes hidrológicos, dificultando e incluso impidiendo el aprovechamiento para el abastecimiento humano y las demás actividades.

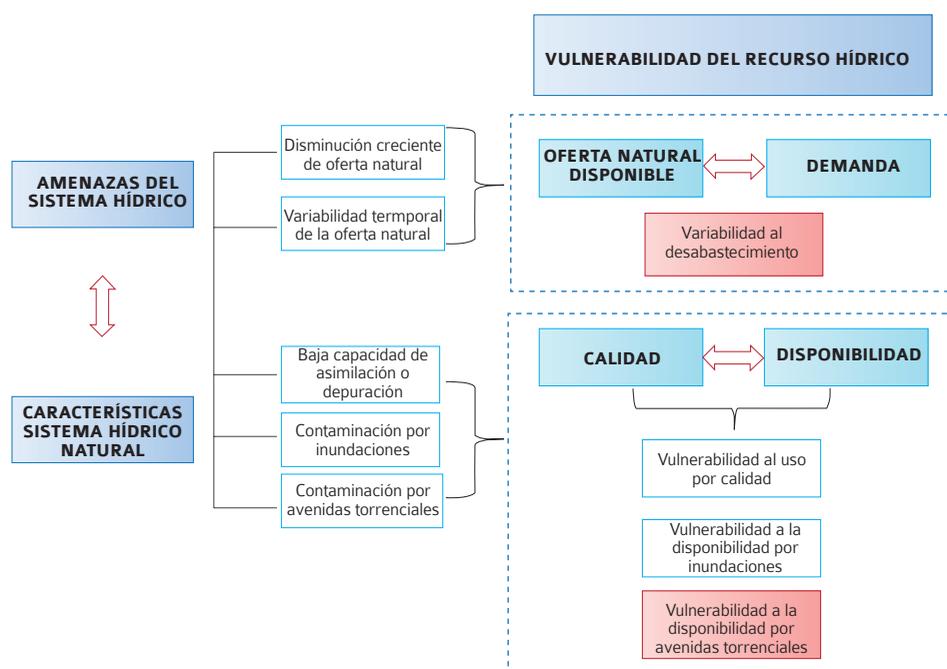


Figura 64. Modelo conceptual para evaluar la vulnerabilidad del recurso hídrico

5.1.4. Modelo conceptual para amenazas al territorio

Como parte del análisis sobre el comportamiento de los sistemas hídricos y sus efectos sobre el territorio, se examinan los eventos de inundación lenta y torrencial, que puedan configurarse en amenaza para la población y sus actividades; dada la alteración de sus condiciones naturales y por la ocupación de áreas que cumplen un papel de regulación en periodos de exceso de agua. En la Figura 65 se ilustra el marco conceptual para análisis de amenazas en el territorio.

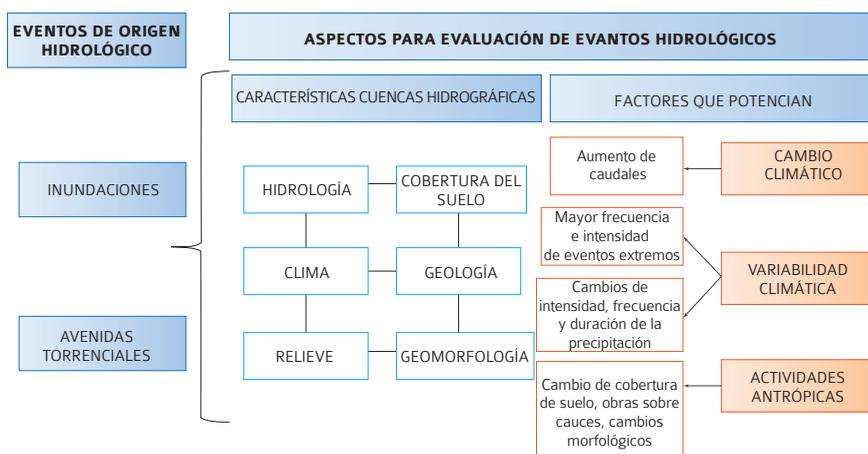


Figura 65. Modelo conceptual para análisis de amenazas en el territorio

Inundación

Las inundaciones debidas a flujos excedentes son procesos naturales que se han producido a lo largo del tiempo y que han sido la causa de la formación de llanuras en los valles de los ríos y evolución de tierras fértiles (IDEAM y UN, 2011). Las inundaciones son flujos de aguas que sobrepasan las orillas naturales o artificiales de una corriente, y ocupan una porción del terreno que, en condiciones normales, permanece por encima del nivel de los cuerpos de agua que lo rodean. Son procesos naturales recurrentes que hacen parte de la dinámica de evolución de un río (Unesco y RAPCA, s.f.).

Las causas de las inundaciones están relacionadas con factores climáticos debido a excesiva precipitación, alta intensidad y/o duración; descongelamiento de hielo. Estos en combinación con otros factores causan inundaciones estuarinas e inundaciones marinas cuya intensidad depende de la dirección y potencia del viento e intensidad de sistemas de baja presión, el nivel de las mareas y la naturaleza de la línea costera. Otras inundaciones están relacionadas con eventos climáticos: tsunamis producidos por terremotos; represamiento de ríos en presas naturales, rompimiento de presas y diques naturales o artificiales, movimientos de masa afectando cuerpos de agua (*Ibid.*).

Las inundaciones pueden convertirse en una amenaza para la población y sus actividades cuando se producen daños y pérdidas durante su ocurrencia por:

- Cambios en el tipo de uso del suelo, la deforestación, la urbanización y la construcción de infraestructura como diques y canalizaciones sobre la red de drenaje que desregula las dinámicas naturales.
- Efectos colaterales de los eventos naturales como las erupciones volcánicas, tsunamis, sismos y cambios climáticos que alteran las condiciones atmosféricas y/o de la corteza terrestre generando descongelamiento, cambios de precipitación y movimientos en masa que magnifican y distorsionan los efectos de la inundación sobre el territorio.

- La localización de asentamientos urbanos, actividades productivas e infraestructura cercana a los cauces y en las áreas de inundación.

Avenidas torrenciales

Corresponden a crecientes súbitas en cauces de montaña, con descargas pico de gran magnitud, producidas por tormentas severas generalmente de limitada extensión en área. Son uno de los tipos más comunes de amenazas y son extremadamente peligrosas debido a su naturaleza rápida.

Sus características son: corta duración, pequeña extensión de área de influencia, alto caudal pico y flujo rápido generalmente causantes de daños importantes. Ocurren a causa de tormentas de alta intensidad, altas pendientes en las cuencas, cobertura vegetal pobre y flujo de alta velocidad. Se ven afectadas de manera importante cuando el índice de infiltración se reduce por tormentas previas y se pueden subdividir de acuerdo al material de arrastre de la corriente.

5.2. Procedimiento metodológico

5.2.1. Amenazas al sistema hídrico natural por variabilidad y cambio climático

La disminución de la oferta hídrica natural de manera temporal o definitiva de la variación en el espacio y tiempo del comportamiento de la precipitación, como consecuencias de la variabilidad climática y el cambio climático.

El IDEAM desarrolló una propuesta metodológica para identificar los cambios en los valores estadísticos que describen las distribuciones de probabilidad de series mensuales de escorrentía en 28 zonas hidrográficas de Colombia, como respuesta a cambios en la precipitación, estimados como respuesta al cambio climático global en el periodo 2011-2040 (IDEAM y Caicedo, 2011), que puede ser referencia para la Evaluación Regional del Agua junto con otros procesos conceptuales y metodológicos que se desarrollan a nivel regional para identificar los efectos del cambio climático sobre el régimen hídrico y la oferta hídrica natural.

5.2.2. Amenazas al sistema hídrico natural por pérdidas de ecosistemas reguladores

Para valorar el tipo y grado de las amenazas que causan disminución de la capacidad de los sistemas hídricos para retener y regular los caudales se analizarán los resultados de la aplicación de los Índices de Retención Hídrica (IRH) e Índices de Aridez (IA) que permitan identificar aquellas cuencas donde se están manifestando dichos efectos, y determinar de acuerdo a los cambios o pérdidas de cobertura, la

relación entre las dinámicas de los procesos erosivos y de laderas y los impactos de las actividades antrópicas que afectan la regulación.

- Identificar las cuencas con rangos de Índice de retención y regulación hídrica (IRH) catalogadas como muy baja a media y de aquellas que presenten un rango entre alto deficitario a moderado del Índice de Aridez.
- Realizar el análisis multitemporal para identificar la evolución sobre la dinámica de los procesos erosivos, los movimientos en masa y los cambios de cobertura por actividad humana en las cuencas identificadas para determinar las áreas con mayor amenaza de pérdida de coberturas y ecosistemas esenciales para la regulación hídrica.
- Determinar la relación y el nivel o grado de vulnerabilidad de los ecosistemas reguladores de las cuencas seleccionadas.

5.2.3. Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de acuíferos

La vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación se realiza a través de evaluación de tres factores, principalmente: (1) la capacidad de atenuación de la carga contaminante que ocurre en el suelo, en la zona no saturada y en la zona saturada; (2) la resistencia o la inaccesibilidad en el sentido hidráulico a la penetración de los contaminantes; y (3) los factores externos que puedan facilitar o retardar el impacto de las cargas contaminantes, como la pendiente del terreno y la recarga del acuífero son un valor indicativo (cualitativo) y no cuantitativo, por tanto los resultados que se obtienen de su evaluación son relativos y adimensionales. (Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación) (MADS y Vargas, 2010).

La vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación generalmente se clasifica desde baja, media, alta, muy alta, hasta extrema. Los resultados de esta evaluación se suelen presentar en mapas temáticos, los cuales zonifican un territorio en áreas de diferente aptitud potencial para un propósito específico, es decir mapas orientados a usos u objetivos concretos (*Ibíd.*).

5.2.4. Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de aguas superficiales

La evaluación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de aguas superficiales se realizará a través de la determinación de la capacidad de asimilación y depuración de las fuentes hídricas, dado su régimen hidrológico y en relación a diferentes tipos de cargas contaminantes.

5.2.5. Vulnerabilidad al desabastecimiento del agua

Para evaluar la vulnerabilidad al desabastecimiento del agua, se tendrá en cuenta indicadores desarrollados en los componentes de oferta y demanda de la siguiente manera:

- La evaluación de la vulnerabilidad por desabastecimiento del agua para la condición de análisis *“donde la demanda superior o igual a una oferta disponible con comportamiento estable y permanente”*, se realiza por medio del índice de uso del agua (IUA) para identificar aquellas cuencas que arrojen valores ≥ 50 .
- La evaluación de la vulnerabilidad por desabastecimiento del agua para la condición de análisis *“donde la oferta natural presenta alteraciones importantes por cambios climáticos y las actividades humanas, disminuyendo la oferta disponible del recurso y desequilibrando la relación oferta-demanda de manera permanente”*, se realiza a través del análisis del indicador de vulnerabilidad a efectos de variabilidad climática desarrollado por IDEAM y Caicedo F. (2011), en relación con el IUA.
- Se utilizarán los indicadores de vulnerabilidad a cambio climático en proceso de validación como son los de IDEAM y Caicedo F. (2011) o los que se vienen adelantando desde las corporaciones.
- La evaluación de la vulnerabilidad por desabastecimiento del agua para la condición de análisis *“donde el comportamiento natural de los regímenes hidrológico e hidrogeológico presentan fluctuaciones temporales que no están acordes a una demanda más constante en la unidad de tiempo de análisis”*, se realiza a través del Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico (IVDH).

5.2.6. Vulnerabilidad a la disponibilidad del agua por calidad

La evaluación de la vulnerabilidad a la disponibilidad del agua para consumo humano se realiza a través del análisis del indicador de eventos torrenciales en las cuencas abastecedoras de cabeceras municipales (IVET). Este indicador relaciona los índices morfométricos de torrencialidad, como el coeficiente de compacidad o de forma, la pendiente media de la cuenca y la densidad de drenaje, con el índice de variabilidad de los caudales.

En relación con la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas durante los eventos de inundación lenta por desbordamiento de cauces o ascenso del mar, y por aportes sólidos procedentes de movimientos en masa y de erosión, se requiere desarrollar los indicadores e incorporarlos en los ERA. Igualmente, se requiere construir un indicador que permita identificar la vulnerabilidad a la contaminación por efecto de las cargas contaminantes vertidas a lo largo del cauce.

5.2.7. Inundaciones

Para delimitar las zonas inundables a mayor resolución que la generada por el IDEAM a escala 1:100.000 se requiere adelantar las siguientes actividades descritas en el documento “*Criterios para identificar y delimitar zonas inundables a escala 1:25.000*” (IDEAM, 2012), que se reseñan y ajustan de la siguiente manera:

- Determinar el nivel de resolución o escala de la cartografía básica disponible en formato digital o análogo (IGAC), para el área de jurisdicción de la corporación priorizando las zonas afectadas y los centros urbanos.
- Imágenes de sensores remotos con resolución inferior a 10 m de pixel (p. ej., SPOT, QuickBird, RADARSAT2, ADS-80, LIDAR y fotografías aéreas, entre otros).
- Realizar el inventario de estaciones hidroclimatológicas, las variables con información y el período de registro.
- Identificar los mecanismos predominantes que ocasionan las inundaciones (fluvial, pluvial, costero, otros).
- Revisar los eventos históricos y priorizar las áreas con mayor recurrencia de inundaciones.
- Identificar tipo y fecha de las inundaciones, frecuencia de los eventos y número de personas y viviendas afectadas.
- Determinar huellas de las crecientes y en caso de contar con información de estaciones hidrológicas relacionarlas con la información de niveles registrados.
- Elaborar información geomorfológica pertinente a la escala cartográfica para delimitar geoformas de la dinámica fluvial, antiguas y activas y determinar la frecuencia cualitativa de inundación, e incluso inferir órdenes de extensión de parámetros como la profundidad, velocidad de la corriente o carga sólida transportada.
- La definición de las áreas susceptibles a inundarse por efectos de la dinámica actual de las aguas superficiales, se realiza a través de: a) la elaboración de mapas de geomorfología fluvial y b) del inventario o registro actual de las áreas inundadas, que permita:
 - » La zonificación de los cauces de acuerdo al tipo de dinámica fluvial.
 - » La delimitación y caracterización de las áreas susceptibles a inundarse de acuerdo al tipo de dinámica fluvial actual de los tramos zonificados.

5.2.8. Avenidas torrenciales

Para la delimitación de las áreas que pueden verse afectadas por eventos de origen torrencial, se realizará de la siguiente manera:

- Selección de las cuencas con susceptibilidad a presentar eventos torrenciales. Se realizará a través de la aplicación del Índice de Eventos Torrenciales (IVET), y se seleccionarán aquellas que presenten de alta a muy alta susceptibilidad.
- En las cuencas seleccionadas, se realizará una delimitación de las áreas de posible afectación a través de análisis de características morfométricas, inventario de procesos e interpretación de fotografías aéreas o satelitales disponibles.

- Con base en la información anterior, se realizará una priorización de las cuencas para estudios de mayor resolución.

5.3. Marco normativo del riesgo

El artículo 5, numeral 35, de la Ley 99 de 1993, Funciones del Ministerio de Ambiente como cabeza del SINA, designa: *“Hacer evaluación, seguimiento y control de los factores de riesgo ecológico y de los que puedan, incidir en la ocurrencia de desastres naturales y coordinar con las demás autoridades las acciones tendientes a prevenir la emergencia o a impedir la extensión de sus efectos”*.

La Ley 1523 de 2012 plantea en su artículo 2 que *la gestión del riesgo es responsabilidad de todas las autoridades y de los habitantes del territorio colombiano” y que en cumplimiento de esta responsabilidad, las entidades públicas, privadas y comunitarias desarrollarán y ejecutarán los procesos de gestión del riesgo, entiéndase: conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y manejo de desastres, en el marco de sus competencias, su ámbito de actuación y su jurisdicción, como componentes del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres.*

El principio de sostenibilidad ambiental (Ley 1523 de 2012, artículo 3, numeral 9) plantea que *“El riesgo de desastre se deriva de procesos de uso y ocupación insostenible del territorio, por tanto, la explotación racional de los recursos naturales y la protección del medio ambiente constituyen características irreductibles de sostenibilidad ambiental y contribuyen a la gestión del riesgo de desastres”*.

En tal sentido, el SINA se coordina con las entidades públicas y privadas del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo del Desastre, desde los aspectos ambientales, para coordinar acciones tendientes a la protección de la población y sus actividades ante eventos de origen natural, socionatural o antrópico no intencional. A su vez, desarrolla procesos de conocimiento, reducción y recuperación de riesgos a la biodiversidad y los servicios ecosistémicos en razón a la ocurrencia de eventos naturales, la actividad del hombre sobre la naturaleza y el uso y aprovechamiento por estos.



En el marco del modelo conceptual del sistema de indicadores para las ERA propuesto en el capítulo 2 de este documento se presenta un conjunto de indicadores que cubre dos aspectos: los indicadores relacionados con el sistema hídrico natural y los relacionados con la intervención antrópica. Se identifican 12 indicadores representativos.

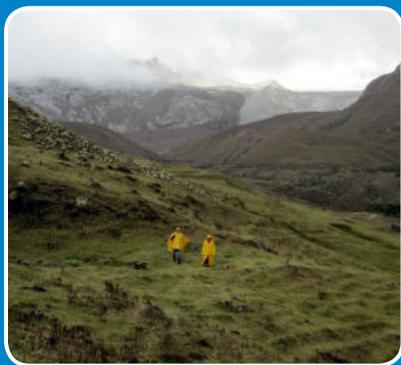
Este sistema de indicadores construido de forma gradual y coherente permitirá una evaluación y comparación permanente de escenarios dinámicos, que varían en el espacio y en el tiempo así como apoyar y optimizar la relación entre la disponibilidad y demandas del recurso, con protección adecuada de ecosistemas asociados a fuentes abastecedoras y receptoras de efluentes y residuos.

En los siguientes capítulos se presentan los indicadores enmarcados dentro de los ítems acordados por las instituciones para las fichas metodológicas en el SIAC. Esta ficha considera los siguientes aspectos para la mayoría de estos indicadores: a) conceptos que lo sustentan; b) definición y significado; c) fórmula y unidad de medida; d) descripción metodológica; e) fuente y disponibilidad de datos; f) periodicidad de actualización y g) documentación soporte.



PARTE III

Sistema de indicadores hídricos regionales



Capítulo 1.
Conceptos y metodología para la construcción de indicadores de sistema hídrico natural



Capítulo 2.
Conceptos y metodología para la construcción de indicadores de intervención antrópica





Capítulo 1

Conceptos y metodología para la construcción de indicadores de sistema hídrico natural

De los tres indicadores considerados en este capítulo, el de retención y regulación hídrica y el de aridez forman parte de la evaluación nacional, ENA, 2010. El índice de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación se propone para las ERA.

1.1. Índice de retención y regulación hídrica (IRH)

Definición y significado

“Este índice mide la capacidad de retención de humedad de las cuencas con base en la distribución de las series de frecuencias acumuladas de los caudales diarios. Este índice se mueve en el rango entre 0 y 1, siendo los valores más bajos los que se interpretan como de menor regulación” (IDEAM, 2010a).

Fórmula y unidad de medida del indicador

El cálculo del indicador se realiza empleando la siguiente ecuación:

$$\text{IRH} = \text{Vp}/\text{Vt}$$

Ecuación 31

Donde:

IRH: índice de retención y regulación hídrica

Vp: volumen representado por el área que se encuentra por debajo de la línea de caudal medio en la curva de duración de caudales diarios

Vt: volumen total representado por el área bajo la curva de duración de caudales diarios.

Es un indicador dimensional que varía entre 0 y 1. Los valores se agrupan para tener una descripción cualitativa desde muy alta capacidad de retención y regulación de humedad hasta muy baja.

Descripción metodológica:

La base del cálculo para determinar el "IRH" es la curva de duración de caudales mensuales o diarios. Estas curvas interpretan las características del régimen hidrológico de la cuenca de un río en su parte alta, media y baja. La capacidad de regulación de una cuenca está relacionada con las características de la cuenca: topografía, geología, suelos, vegetación y clima. Entre los factores de mayor influencia en la regulación se encuentran el relieve, el área de cuenca, la lluvia media anual y la altitud. La frecuencia de ocurrencia de los caudales diarios, expresadas en la curva de duración, sintetiza en gran medida esta interacción de factores.

La metodología propone obtener el indicador a partir de la construcción de la curva de duración de caudales medios mensuales o diarios en las estaciones de la red de monitoreo seleccionadas; se calcula la relación del área o el volumen que hay por debajo de la línea del caudal medio sobre el área o volumen total que está por debajo de la curva total de duración de caudales mensuales o diarios (Figura 66) igualmente, en la Tabla 15 se observan las categorías del índice de retención y regulación hídrica.

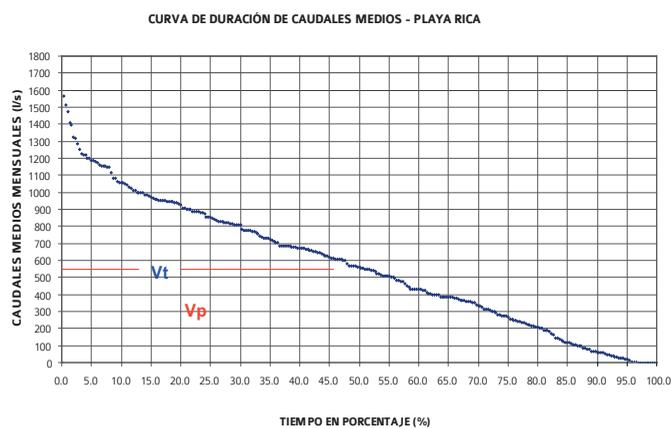


Figura 66. Curva de duración de caudales

Los valores obtenidos se agrupan en rangos para facilitar la comparación entre unidades hídricas de análisis. A cada rango se le asigna una calificación cuantitativa. Las cinco categorías propuestas se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15. Categorías del índice de retención y regulación hídrica (IRH)

Rango de valores IRH	Categoría	CARACTERÍSTICAS
> 0.85	Muy alto	Capacidad de la cuenca para retener y regular muy alta
0.75 - 0.85	Alto	Capacidad de la cuenca para retener y regular alta
0.65 - 0.75	Medio	Capacidad de la cuenca para retener y regular media
0.50 - 0.65	Bajo	Capacidad de la cuenca para retener y regular baja
< 0.50	Muy bajo	Capacidad de la cuenca para retener y regular muy baja

Con este índice se generan isolíneas cuya resolución depende de la densidad de estaciones hidrológicas utilizadas de referencia. La formulación de este indicador y los resultados a nivel nacional para zonas y subzonas se presentaron en el Capítulo 3 del ENA, 2010 (IDEAM, 2010a).

Fuente y disponibilidad de datos

La principal fuente de datos es el IDEAM con las series históricas de caudales medios diarios mayores de 15 años, provenientes de la red de monitoreo de referencia nacional. Así mismo, algunas series de datos de caudal de redes regionales de monitoreo de las autoridades ambientales (CAR, AAU, PNN) y de empresas de servicios de agua potable como EPM y EAAB, así como la cartografía básica del IGAC en diferentes escalas.

La limitación principal para obtener este indicador es la carencia de estaciones hidrológicas y densidad de la red de monitoreo en las unidades hidrográficas representativas en la regiones.

Documentación relacionada con el indicador

Estudio Nacional del Agua 2010 (IDEAM, 2010a).

1.2. Índice de aridez (IA)

Definición y significado:

Es una característica cualitativa del clima, que permite medir el grado de suficiencia o insuficiencia de la precipitación para el sostenimiento de los ecosistemas de una región. Identifica áreas deficitarias o de excedentes de agua, calculadas a partir del balance hídrico superficial. Integra el conjunto de indicadores definidos en el ENA 2010 (IDEAM, 2010).

Fórmula y unidad de medida del indicador

Se calcula empleando la siguiente ecuación:

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

Ecuación 32

Donde:

- Ia: índice de aridez (adimensional)
- ETP: evapotranspiración potencial (mm)
- ETR: evapotranspiración real (mm).

El índice de aridez así calculado representa la dinámica superficial del suelo y no se refiere a la dinámica subsuperficial del suelo utilizada en análisis climáticos para clasificar el grado de humedad a través de la precipitación y la evapotranspiración potencial (ENA-IDEAM, 2010).

Descripción metodológica

La evapotranspiración potencial representa un factor determinante en la obtención del índice. Para el cálculo de la Evapotranspiración potencial, se utilizan las ecuaciones de Penman y Montieh y, para el de la evapotranspiración real, se utilizan las ecuaciones de Turc y Budyko.

La resolución del índice está en función de la densidad de la red de estaciones hidrometeorológicas con series históricas mayores de 15 años. Con este índice, se generan mapas de isóneas que permiten analizar y caracterizar áreas hidrográficas deficitarias o con excedentes de agua a nivel cuencas y subcuencas, con definición temporal media anual y mensual multianual.

La formulación de este indicador y los resultados en el ámbito nacional se presentaron en el Capítulo 3 del ENA, 2010 (IDEAM, 2010a).

A partir de los cálculos del índice para estaciones representativas de las unidades hídricas de análisis en las regiones, las isóneas se construyen con los rangos que se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Categorías para el índice de aridez (IA)

Rango de valores Índice de Aridez	Categoría	CARACTERÍSTICAS
< 0.15		Altos excedentes de agua
0.15 - 0.19		Excedentes de agua
0.20 - 0.29		Entre moderado y excedentes de agua
0.30 - 0.39		Moderado
0.40 - 0.49		Entre moderado y deficitario de agua
0.50 - 0.59		Deficitario de agua
> 0.60		Altamente deficitario de agua

Fuente y disponibilidad de datos

La resolución del índice está en función de la densidad de la red de estaciones hidrometeorológicas.

Con este índice se generan mapas que permiten analizar y caracterizar áreas hidrográficas deficitarias o con excedentes de agua a nivel unidades hídricas de análisis, con definición temporal media mensual multianual.



Se requiere información de las variables precipitación, temperatura y caudal; también las variables requeridas para el cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP). Este índice se ha calculado en ENA anteriores y en la Corporación Regional de Cundinamarca (CAR) con la misma metodología. La principal fuente de datos es el IDEAM con las series históricas de las redes de monitoreo hidrológicas y meteorológicas. Adicionalmente, las series de datos de redes regionales de monitoreo de autoridades ambientales (CAR, AAU, PNN) y de empresas de servicios de agua potable como EPM y EAAB. Para la cartografía básica en diferentes escalas la fuente de datos oficial es el IGAC.

La limitación principal para obtener este indicador es la carencia de estaciones hidrológicas y meteorológicas con densidad representativa de puntos de monitoreo para las unidades de análisis de las regiones, así como la longitud de series históricas de caudales diarios mayores de 15 años.

Documentación relacionada con el indicador

Estudio Nacional del Agua 2010 (IDEAM, 2010a).

1.3. Índice de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de agua subterránea (IVICAS)

Definición y significado del indicador

Este indicador permite medir la susceptibilidad de un acuífero o sistema acuífero a ser contaminado en función de sus características intrínsecas (Foster y Hirata, 1987; Unesco *et ál.*, 2007), por lo tanto es un indicador de presión (Unesco *et ál.*, 2007). Este indicador apoya la gestión y la política de protección de las aguas subterráneas. La cantidad, calidad y distribución de los datos básicos determina la calidad y la precisión del indicador (*Ibíd.*).

La vulnerabilidad de aguas subterráneas es una propiedad relativa, no medible, por lo tanto es adimensional. Generalmente, se emplea la ponderación de parámetros y métodos de calificación para expresar relaciones entre las variables y para reflejar su importancia para la evaluación de vulnerabilidad de las aguas subterráneas. Las principales variables aplicadas en la evaluación de la vulnerabilidad son: recarga, las propiedades de la zona no saturada y suelo, nivel freático y la conductividad hidráulica de la zona saturada (*Ibíd.*).

Para el cálculo del indicador se debe utilizar el método más apropiado (GOD, DRASTIC, etc.) que esté de acuerdo con las características regionales, las cuales se referencian en el Capítulo 2 de la Parte II. La vulnerabilidad generalmente se clasifica en tres tipos: baja o insignificante, moderada y alta. Las variables que típicamente han sido utilizadas para formular el indicador corresponden a las

propiedades del suelo, la litología, el espesor de la zona no saturada y el nivel del agua subterránea (*Ibíd.*). La escala de aplicación del indicador puede ser del orden internacional, nacional y local, y a nivel agua subterránea (acuíferos, sistemas de acuíferos, entre otros) (*Ibíd.*).

La frecuencia del cálculo del indicador está asociada a la disponibilidad de datos más precisos en cuanto a recarga, información del suelo, geología e hidrogeología.

Descripción metodológica

Para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible desarrolló una guía en el año 2010, donde se pueden consultar las metodologías más utilizadas, sus ventajas y limitaciones, además se presentan los resultados de algunas experiencias en el país (MAVDT, 2010).

Fuente y disponibilidad de datos

Las metodologías para determinar la vulnerabilidad del agua subterránea generalmente se basan en información sobre recarga neta, la capacidad del suelo de atenuación (en particular contenido de minerales de arcilla y materia orgánica, capacidad de intercambio iónico, textura y grosor), litología zona no saturada, el espesor y la conductividad hidráulica vertical, zona saturada litología (la consolidación y la estratificación) y la conductividad hidráulica, y tiempo de residencia de las aguas subterráneas (años).

Las principales fuentes de datos de aguas subterráneas en Colombia son las entidades que tienen injerencia en estos recursos como el Servicio Geológico de Colombia (antes Ingeominas), el IDEAM, el MADS, las CAR, las empresas de abastecimiento de agua y las redes de monitoreo de las aguas subterráneas nacionales. La frecuencia del cálculo del indicador está asociada a la disponibilidad de datos más precisos en cuanto a recarga, información del suelo, geología e hidrogeología.





Capítulo 2

Conceptos y metodología para la construcción de indicadores de intervención antrópica

Los indicadores de intervención antrópica son los que además de considerar los factores climáticos, hidrológicos e hidrogeológicos incorporan la interacción con la actividad antrópica. En este sentido se reconocen tres grupos de indicadores: a) los relacionados con la presión por el uso de agua superficial o subterránea; b) los de estado de la calidad de agua y presión por contaminación; y c) indicadores asociados con el riesgo para la evaluación regional del agua.

2.1. Indicadores de presión por uso del agua

Como indicadores de presión se consideran cuatro índices: el índice de uso del agua y el índice extracción de agua subterránea, el índice de agua subterránea para abastecimiento público con respecto al número de habitantes y el índice integral de uso de agua superficial y subterránea.

2.1.1. Índice de uso del agua superficial (IUA)

Este indicador integra el conjunto de indicadores definidos en el ENA, 2010 (IDEAM, 2010a). En este documento se presenta la metodología para el cálculo de las variables en su expresión en el ámbito regional.

Definición y significado

Cantidad de agua utilizada por los diferentes sectores usuarios, en un período determinado (anual, mensual) y unidad espacial de análisis en relación con la oferta hídrica regional disponible (OHRD) neta para las mismas unidades de tiempo y espaciales.

En sentido estricto el indicador debe considerar la oferta hídrica superficial y subterránea en forma unitaria. Sin embargo, mientras se consolida y valida el

indicador integral de uso del agua propuesto en las ERA el IUA representa la presión por el uso sobre la oferta hídrica disponible superficial.

Fórmula y unidad de medida del indicador

Relación porcentual de la demanda de agua en relación a la oferta hídrica regional disponible.

$$\text{IUA} = (\text{Dh/OHRD}) * 100$$

Ecuación 33

Donde:

IUA: índice de uso del agua

Dh: \sum (volumen de agua extraída para usos sectoriales en un período determinado).

OHRD: oferta hídrica superficial regional disponible.

Acorde con lo presentado en la Figura 21, para determinar la OHRD se consideran tres casos:

- Cuando el caudal es estimado por balance hídrico
- Cuando los caudales son deducidos mediante un modelo lluvia-caudal
- Cuando los datos son obtenidos directamente en una estación hidrológica.

La OHRD para los dos primeros resulta de sustraer de la oferta hídrica natural el caudal ambiental, teniendo en cuenta los caudales de trasvase o retorno si es el caso.

La OHRD para el tercer caso cuando se estima a partir de caudal (estaciones hidrológicas de cuencas muy intervenidas OHRA) corresponde al volumen de agua que resulta de adicionar a la oferta hídrica regional aprovechable la demanda hídrica. La unidad de medida es adimensional y se expresa en términos de porcentaje.

Para las evaluaciones regionales se propone avanzar gradualmente en la estimación de los usos y consumos relacionados con los otros usos de sectores también mencionados en el Decreto 3930 de 2010, tales como para los usos recreativo, estético y tradicional; navegación y el transporte; y consumo de la minería e hidrocarburos. La demanda total estaría representada por la Ecuación 18 (ítem 3.2.2, Parte II).

Descripción metodológica:

El IUA se calcula para las unidades hidrográficas de análisis, según la zonificación regional. Adicionalmente, se puede generar para unidades hídricas fuentes de abastecimiento de acueductos municipales como indicativo de la presión. Depende en gran medida de la resolución y escala de la información.

El cálculo de la oferta hídrica se realiza para condiciones hidrológicas medias y secas con base en las series de caudales medios mensuales y anuales. Las condiciones

secas corresponden al año típico seco, construido a partir de los caudales mínimos de las series de los caudales medios mensuales.

La metodología y determinación de la oferta hídrica superficial y de la demanda de agua sectorial para unidades hídricas regionales de análisis, en condiciones hidrológicas medias y secas, se presentan en la Parte II capítulos 1 y 3.

La categorización de condición de presión de la demanda sobre la oferta hídrica se define a partir de los mismos cinco rangos y categorías utilizados en el ENA, 2010: muy alto, alto, medio, bajo y muy bajo.

Tabla 17. Rangos y categorías del índice de uso del agua (IUA)

Rango (Dh/Oh)*100 IUA	Categoría IUA	Significado
>50	Muy alto	La presión de la demanda es muy alta con respecto a la oferta disponible
20.01 - 50	Alto	La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible
10.01 - 20	Moderado	La presión de la demanda es moderada con respecto a la oferta disponible
1 - 10	Bajo	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
≤ 1	Muy bajo	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible

Fuente y disponibilidad de dato

Series históricas de caudales diarios y mensuales con longitud temporal mayor de 15 años. Información de demanda sectorial para los diferentes usos.

Periodicidad en la actualización

El indicador se actualiza cada cuatro años.

2.1.2. Índice de extracción de agua subterránea (IEAS)

Definición y significado

Este indicador permite reconocer a nivel anual la intensidad de uso que se hace de la oferta renovable de aguas subterráneas (recarga) (Unesco et ál., 2007). Es definido así:

$$\text{IEAS} = \text{Extracción total de aguas subterráneas} / \text{Recarga} * 100$$

La unidad de medida es adimensional y se expresa en términos de porcentaje.

La escala de aplicación del indicador se refiere a las unidades de agua subterránea (acuíferos) o sistemas de acuíferos. La delimitación de la zona de aplicación requiere una interpretación muy cuidadosa porque comúnmente no coinciden las profundidades y tomas de las captaciones y los límites de las formaciones geológicas (Unesco *et ál.*, 2007).

Descripción metodológica

La abstracción excesiva de aguas subterráneas sin el conocimiento adecuado de las tasas de recarga, a menudo podría generar problemas como el agotamiento de los recursos o daños permanentes en el acuífero y, a veces, la subsidencia del terreno. Este indicador es una herramienta de la sostenibilidad del recurso, a través de la relación entre la estimación de la abstracción y, la recarga de agua subterránea (*Ibíd.*). El mayor desafío es la precisión en la estimación de la recarga, la cual se puede realizar acorde a los métodos indicados en el Capítulo 2 de la Parte II.

El IEAS es un indicador de estado, cuya periodicidad de medición es del orden anual. Es utilizado para dar una indicación del balance hídrico durante un largo período (*Ibíd.*).

2.1.3. Índice de agua subterránea para abastecimiento público con respecto al número de habitantes (IASAP)

Definición y significado del indicador

El indicador permite reconocer el uso que se hace del agua subterránea para abastecimiento público per cápita (Unesco *et ál.*, 2007)

Fórmula y unidad de medida del indicador:

Se calcula a partir de la Ecuación 35:

$$\text{IASAP} = \frac{\text{Agua subterránea para abastecimiento público}}{\text{Número habitantes}}$$

Ecuación 35

Descripción metodológica

Las variables y limitaciones ya han sido definidas en los anteriores indicadores.

[236]

Periodicidad de actualización

El indicador se actualizará anualmente.

2.1.4 Índice integral de uso de agua (IIUA)

Definición

Este índice permite determinar la presión por uso en relación con la oferta disponible de aguas superficiales y la oferta renovable de aguas subterráneas.

Fórmula y unidad de medida del indicador

Se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$IIUA = \frac{D}{O_{rg} + O_d}$$

Ecuación 36

Donde:

- D: demanda total sectorial
- O_{rg} : oferta renovable de aguas subterráneas (recarga)
- O_d : oferta agua superficial disponible

Descripción metodológica

Las variables de este indicador corresponden a la demanda total sectorial cuya metodología está desarrollada en el Capítulo 3, Parte II. El denominador corresponde a los recursos renovables totales de agua disponible. La metodología del componente superficial denominado oferta de agua superficial disponible se explicó en el Capítulo I, Parte II. Por su parte, la oferta renovable de agua subterránea corresponde a la recarga anual generada de precipitaciones endógenas que puede ser calculada utilizando diferentes métodos (IAH, 2002).

Fuente y disponibilidad de datos

La obtención de la información para la estimación de la demanda total de agua se ha explicado al referirnos al índice de uso del agua, de igual manera la información para el cálculo de la oferta hídrica superficial disponible.

Para definir el método a utilizar para el cálculo o estimación de la recarga, se deben tener en cuenta las condiciones hidrogeológicas y climáticas y la disponibilidad de información para el área de interés. Dentro de los métodos para estimar o calcular la recarga se encuentran balances hidrológicos, simulación numérica de la infiltración vertical, la aplicación de la Ley de Darcy para calcular rata recarga/descarga, mediciones de campo con pozos de observación, la aplicación de modelos hidráulicos de flujo de aguas subterráneas, entre otros (IAH, 2002).

Periodicidad en la actualización

Los componentes del indicador se pueden actualizar anualmente y este indicador debe ser actualizado anualmente.

2.2. Indicadores de estado de la calidad de agua y presión por contaminación

Se consideran tres indicadores, dos que dan cuenta de las condiciones de calidad de agua, índice de calidad de agua (ICA), Índice de Calidad Biológica del Agua. Macroinvertebrados Acuáticos (IMA) y un Índice de presión considerando la afectación potencial de la calidad de agua de los sistemas hídricos.

2.2.1. Índice de Calidad del Agua (ICA)

Definición y significado

El índice de calidad físico-química del agua (ICA) es un indicativo de las condiciones de calidad física, química y microbiológica de las corrientes y cuerpos de agua. El indicador permite identificar problemas de contaminación en un punto determinado, para un intervalo de tiempo específico. Permite representar el estado en general del agua y las posibilidades o limitaciones para determinados usos en función de variables seleccionadas, mediante ponderaciones y agregación de variables físicas, químicas y microbiológicas (IDEAM, 2010a).

El índice de calidad del agua es el valor numérico que califica, en una de cinco categorías, la calidad del agua de una corriente superficial con base en las mediciones obtenidas para un conjunto de seis o siete variables¹, registradas en una estación de monitoreo *j* en el tiempo *t*.

Fórmula y unidad de medida del indicador

El índice de calidad del agua es una expresión agregada y simplificada, sumatoria aritmética equiponderada de varias variables. Para el nivel regional se propone calcular el ICA con siete variables, es decir, con inclusión de un parámetro microbiológico.

Las Tablas 18 y 19 resumen las variables que están involucradas en el cálculo del indicador para los casos en los que se emplean seis o siete variables (según la información disponible), la unidad de medida y la ponderación de cada parámetro en la fórmula de cálculo.

$$ICA = \sum_{i=1}^n w_i * l_i$$

Ecuación 37

1 En el ENA, 2010 se identificaron cinco variables representativas de los principales tipos de contaminación: para materia orgánica, DQO; material en suspensión, sólidos suspendidos totales, SST; y porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, PSOD; para mineralización, conductividad eléctrica del agua; y para acidez o alcalinidad, el pH del agua (*Ibíd*).

Donde:

li : valor calculado de la variable i (obtenido de aplicar la curva funcional o ecuación correspondiente)

wi : ponderación

Tabla 18. Variables involucradas en el cálculo del ICA (6)

ICA (6 variables)		
Variable	Unidad de medida	Ponderación, w_i
Oxígeno disuelto, OD.	% saturación	0,17
Sólidos suspendidos totales, SST.	mg/l	0,17
Demanda química de oxígeno, DQO.	mg/l	0,17
N total/P total	(mg/l)/(mg/l)	0,17
Conductividad eléctrica, C.E.	μ S/cm	0,17
pH	Unidades de pH	0,15

Tabla 19. Variables involucradas en el cálculo del ICA (7)

ICA (7 variables - Incluye coliformes fecales)		
Variable	Expresada como	Peso de importancia
Oxígeno disuelto, OD	% saturación	0.16
Sólidos en suspensión	mg/l	0.14
Demanda química de oxígeno, DQO	mg/l	0.14
Conductividad eléctrica	μ S/cm	0.14
Relación N total/P total	(mg/l)/(mg/l)	0.14
pH	Unidades de pH	0.14
Coliformes fecales	UFC/100 ml	0.14

Descripción metodológica

De acuerdo con la hoja metodológica, versión 1.0, elaborada por el IDEAM (2011), se identifican seis variables básicas, la cual se puede consultar para calcular cada una de las variables de la fórmula del indicador.

En la Tabla 20 se registran las categorías para los descriptores de calidad del indicador.

Tabla 20. Descriptores de calidad del ICA

Categorías de valores que puede tomar el indicador	Calificación de la calidad del agua	Señal de alerta
0,00 – 0,25	Muy mala	Rojo
0,26 – 0,50	Mala	Naranja
0,51 – 0,70	Regular	Amarillo
0,71 – 0,90	Aceptable	Verde
0,91 – 1,00	Buena	Azul

Fuente: IDEAM, 2011.

La ponderación de las variables físicas, químicas y microbiológicas puede variar en función de la relevancia para análisis específicos de condiciones de calidad de aguas (IDEAM, 2010a).

Los indicadores ICA básicamente son una expresión de un número de parámetros que permiten valorar el recurso hídrico para un determinado uso.

Fuente y disponibilidad de datos

Información de los parámetros DQO, OD, SST, conductividad eléctrica, nitrógeno total, fósforo total, coliformes fecales y pH, producto del monitoreo de las condiciones de calidad en las estaciones de la red regional de calidad del agua y/o de los puntos de monitoreo para evaluar la calidad del agua en las corrientes superficiales.

Periodicidad en la actualización

Se pueden hacer análisis anuales (promedio) en función de las campañas de monitoreo que se realicen en la red regional de calidad del agua.

Se recomienda calcular el indicador con una periodicidad anual como mínimo para cada unidad espacial de análisis.

Documentación relacionada con el indicador

Estudio Nacional del Agua 2010 (IDEAM, 2010a) y referencias bibliográficas de soporte para el estudio.

2.2.2. Índice de Calidad Biológica del Agua. Macroinvertebrados Acuáticos (IMA)

Definición y significado

Los macroinvertebrados acuáticos (MA) son uno de los grupos biológicos más ampliamente utilizados como bioindicadores de calidad de agua debido a sus peculiares características: gran diversidad de especies con diferente tolerancia a los niveles de contaminación; escasa movilidad, no huyen ante eventos de contaminación; su muestreo e identificación es relativamente fácil. Según Roldán (1999), una de las comunidades biológicas que tiene una alta capacidad indicadora de la calidad del agua de los ecosistemas lóticos (ríos), son los MA o fauna béntica. Estos organismos viven en el fondo del lecho de los ríos, fijados a este o permanecen en sus sedimentos; son animales con tamaños mayores a 0.5 mm, observables a simple vista, que viven por lo menos parte de su ciclo de vida asociados con el sustrato del fondo².

2 Ghetti y Bonazzi (1981) consideran los MA como los mejores bioindicadores de la calidad del agua. Les siguen en su orden, las algas, los protozoos, las bacterias y, en menor grado, los peces, las macrófitas, los hongos y los virus.



Los MA son muy importantes en la cadena alimenticia, al liberar paulatinamente los nutrientes atrapados en la hojarasca y residuos vegetales. El estudio cualitativo y cuantitativo de esta comunidad proporciona información útil para determinar la eficacia de los procesos de reciclamiento de materia y su tendencia a equilibrarse después de modificaciones externas.

Los macroinvertebrados bénticos (organismos que viven en el fondo o cerca de él y son retenidos por un tamiz ordinario) son indicadores de episodios de polución recientes, debido a su escasa movilidad y a su sensibilidad al estrés (OMM, 2011).

Fórmula y unidad de medida del indicador

El método Biological Monitoring Working Party (BMWP) ha sido adaptado para Colombia por Gabriel Roldán BMWP/Col (2003), como una primera aproximación para evaluar estos ecosistemas acuáticos³. Este índice se aplica a muestreos cualitativos (presencia o ausencia) con base en el conocimiento que actualmente se tiene en Colombia sobre los diferentes grupos de macroinvertebrados hasta el nivel de familia. A cada una de las familias se le asigna un puntaje, según la tolerancia de los diferentes grupos a la contaminación orgánica.

Descripción metodológica

El método solo requiere la identificación taxonómica de los organismos hasta nivel de familia y los datos son cualitativos (presencia/ausencia). El puntaje oscila entre 1 y 10, de acuerdo con la tolerancia de los diferentes grupos a la contaminación, donde 10 son familias sensibles (P. ej. *Perlidae*, *Oligoneuriidae*, entre otras) que no toleran la contaminación, y 1 son familias que viven en aguas muy contaminadas (p. ej., *Tubificidae*). La suma de los puntajes de todas las familias presentes proporciona el puntaje total BMWP/Col. Cuanto mayor es la puntuación final, menor es el grado de contaminación ambiental.

El puntaje final se compara con la Tabla 21 de valoración de la calidad del agua, y se obtiene una clase de calidad del agua según los valores BMWP/Col., significado y colores para representación cartográfica.

Tabla 21. Valoración de la calidad biológica del agua por el IMA

CLASE	CALIDAD	BMWP/Col	SIGNIFICADO	COLOR
I	Buena	>150, 101 -120	Aguas muy limpias	AZUL
II	Aceptable	61 – 100	Se evidencian efectos de la contaminación	VERDE
III	Dudosa	36 – 60	Aguas moderadamente contaminadas	AMARILLO
IV	Crítica	16 – 35	Aguas muy contaminadas	NARANJA
V	Muy crítica	< 15	Aguas fuertemente contaminadas, situación crítica	ROJO

Fuente: ROLDÁN, 2003.

3 El Biological Monitoring Working Party (BMWP) fue establecido en Inglaterra en 1970, como un método simple y rápido para evaluar la calidad del agua usando los macroinvertebrados como bioindicadores.

Fuente y disponibilidad de datos

Identificación cualitativa de los organismos biológicos recolectados en la zona de muestreo de las estaciones de la red regional de calidad del agua o campañas de monitoreo de la calidad del agua en los cuerpos de agua.

Periodicidad en la actualización

El que se defina en el Programa Regional de Monitoreo, en función del seguimiento al estado de la calidad de agua, se sugiere sea consistente con el ICA para efectos de análisis e interpretación de resultados integrados.

Documentación relacionada con el indicador

Bibliografía soporte y estudios relacionados con MA a nivel Nacional (de algunas Corporaciones)

2.2.3 Índice de alteración potencial de la calidad de agua (IACAL)

Este indicador es un referente de la presión por contaminantes sobre las condiciones de calidad del agua en los sistemas hídricos superficiales.

Definición y significado

Este indicador tiene como propósito determinar las amenazas potenciales por alteración de la calidad en las unidades de análisis. La definición, significado, metodología y estimaciones de este índice se realizan en el *Capítulo 6* del ENA 2010 (IDEAM, 2010a).

El Índice se puede generar a escala municipal en centros urbanos y agregar para unidades hidrográficas de análisis de acuerdo con la zonificación en las regiones.

Fórmula y unidad de medida del indicador

Las fórmulas se muestran en la siguiente descripción metodológica.

Descripción metodológica

En el diagrama de la Figura 67, elaborado para el Estudio Nacional del Agua 2010 y modificado para la ERA, se presenta el esquema que sintetiza el proceso para obtener las estimaciones de carga contaminante y generación del IACAL.

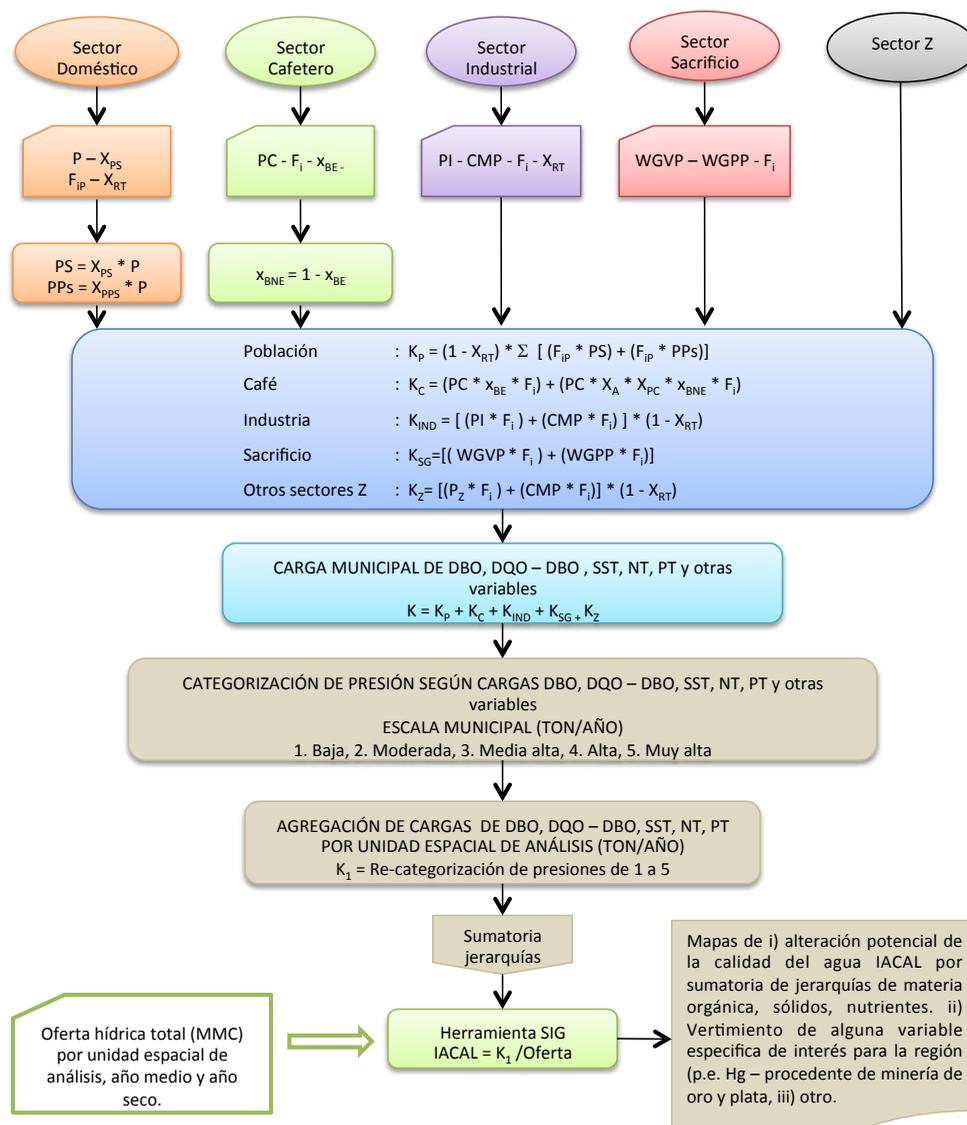


Figura 67. Diagrama metodológico para procesamiento de información para el IACAL

Fuente: Estudio Nacional del Agua 2010 (IDEAM, 2010a) modificado para ERA.

Definición de las variables del diagrama metodológico

- P: población municipal (número de personas)⁴
- X_{PS} : fracción de la población conectada al alcantarillado⁵
- PS: población conectada al alcantarillado (número de personas)
- PPs: población conectada a pozo séptico (número de personas)

4 DANE (s. f.). *Proyección de población en cabecera municipal.*

5 *Censo general 2005 del DANE, Óp. cit. (Cuadro 1.4b).*

F_{ip} : factor de emisión de DBO_5 por persona, según si está conectada al alcantarillado o a pozo séptico⁶

X_{RT} : fracción de remoción de materia orgánica, sólidos y nutrientes dependiendo del tipo de tratamiento⁷ de agua residual doméstica

PC: producción municipal de café⁸ como número de sacos de 60 kg de café pergamino seco⁹

X_{BE} : fracción de beneficio ecológico nacional de café¹⁰

X_{BNE} : fracción de beneficio no ecológico nacional de café

PI:¹¹ producción industrial (cantidad) para las actividades económicas de interés de la unidad de análisis.

CMP: consumo de materias primas para una industria determinada

X_{RT} : fracción de remoción de vertimientos según tecnología prototipo de cada subsector¹²

F_i : factor de emisión para una unidad productiva específica en kg DBO_5 , DQO, SST, NT y PT/ton producto final o materia prima consumida¹³

WGVP: tonelada de animal (vacuno) en pie¹⁴

WGPP: tonelada de animal (porcino) en pie¹⁵

K_p : carga de DBO_5 proveniente de la población en ton/año

K_c : carga de DBO_5 proveniente del beneficio del café en ton/año

K_{IND} : carga de DBO_5 proveniente de la industria (actividades de interés) en ton/año

K_s : carga de DBO_5 proveniente del sacrificio de ganado en ton/año

K: carga municipal de DBO_5 en ton/año

K_z : carga de otra variable de interés de otras actividades económicas específicas de la unidad de análisis, en ton /año. p. ej., minería, etc.

6 OMS,1993: 4-38.

Nota: Los factores de vertimiento pueden calcularse a partir de datos suministrados por las ESP ej. EPM. Otros documentos de las AA como "Guía Metodológica para determinar MÓDULOS DE CONSUMO Y FACTORES DE VERTIMIENTOS DE AGUA, U.P.B.-AMVA, 2010".

7 SSPD, 2009. Óp. cit.(Otra fuente: ESP: PTAR Municipal).

8 CCI (2009) utiliza metodologías objetivas, como el muestreo agrícola de áreas, el de listas, el múltiple, registros administrativos y censos por producto, y las integra con procedimientos subjetivos como las evaluaciones, con el fin de unificar la información de la oferta agropecuaria para reportar a la Encuesta Nacional Agropecuaria.

9 En Cenicafé (2005), por cada 62,5 kg de café en cereza (cc), se producen 12,5 de café pergamino seco (cps).

10 Ibidem. Para una muestra del 1% del total de fincas cafeteras, el beneficio ecológico se practicó en 31% de las fincas.

11 DANE. Encuesta Anual Manufacturera 2007. Apéndices V-1, V-2. Una fuente primaria para acceder fácilmente a datos (en cantidad, toneladas) de producción y materias primas es el Registro Único Ambiental (RUA). La Resolución 0941 de 2009 del MAVDT, crea el Subsistema de Información sobre Uso de Recursos Naturales Renovables (SIUR) y adopta el Registro Único Ambiental (RUA). El RUA es el instrumento de captura para el SIUR. La implementación del RUA se realizará de forma gradual a nivel sectorial, comenzando por los sectores manufacturero, hidrocarburos, agropecuario, minero, energético y continuando con los demás sectores productivos y de servicios (Res. 0941,2009).

12 DANE, Encuesta Ambiental Industrial, Óp. cit. Encuesta Anual Manufacturera. Una fuente primaria para acceder fácilmente a datos (en cantidad, toneladas) de producción y materias primas es el Registro Único Ambiental (RUA).

13 OMS.(1993) Óp. cit.

14 DANE (2008b).

15 Ibidem.

La metodología para la estimación de las cargas vertidas, incluida las cargas removidas por sistemas de tratamiento de aguas residuales y la categorización de las presiones se puede consultar en el ENA, 2010, Capítulo 6. (IDEAM, 2010a). La clasificación final propuesta para el análisis del IACAL se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 22. Categoría y descriptor del IACAL.

IACAL	
Promedio Categoría (NT + PT + SST + DBO + (DQO – DBO) / 5	
Categoría	Valor
Baja	1
Moderada	2
Media Alta	3
Alta	4
Muy Alta	5

Con la aplicación de esta metodología se determina la amenaza potencial en relación con las presiones por contaminación a escala municipal o en unidades hídricas de análisis, según zonificación regional.

Fuente y disponibilidad de datos

Cargas estimadas a partir de inventario consistente en la aplicación de factores de vertimiento de la Organización Mundial de la Salud (1993).

- Población en cabeceras municipales (proyección del DANE, s. f.)
- Actividades económicas industriales priorizadas para la unidad de análisis
- Programas de tasas retributivas y de control de vertimientos de las AA
- Caracterizaciones de unidades productivas
- PSMV de las PTAR municipales y centros poblados

Excluye: patógenos, plaguicidas, microcontaminantes orgánicos tóxicos o persistentes, cancerígenos o disruptores del sistema endocrino y metales pesados.

En la medida que los instrumentos del SIRH avancen en su aplicación e inclusión al sistema de información, serán la base para el cálculo de las cargas contaminantes y análisis de efectos sobre la calidad de agua en las corrientes y cuerpos de agua.

Periodicidad en la actualización

Los inventarios de contaminantes se pueden actualizar anualmente y la oferta hídrica en función de las evaluaciones y sus estudios regionales del agua, en principio cada cuatro años.

Documentación relacionada con el indicador

2.3. Indicadores de riesgo en la Evaluación Regional del Agua

Los análisis básicos de amenazas y vulnerabilidades del sistema hídrico natural y del recurso tienen como uno de los soporte dos indicadores el índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico y el índice de vulnerabilidad a eventos torrenciales.

2.3.1. Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico (IVH)

Definición y significado

Grado de fragilidad del sistema hídrico para mantener una oferta para el abastecimiento de agua que, ante amenazas –como periodos largos de estiaje o eventos como el *Fenómeno cálido del Pacífico* (El Niño)–, podría generar riesgos de desabastecimiento.

Fórmula y unidad de medida del indicador

El IVH se determina a través de una matriz de relación de rangos del índice de regulación hídrica (IRH) y el índice de uso de agua (IUA). Las categorías de este índice se presentan en la Tabla 8.2 del Estudio Nacional del Agua (2010, pág. 330).

Descripción metodológica

La generación del índice está asociada con el campo de aplicación de los IRH y el IUA. Por lo tanto, permite el análisis en las unidades hidrográficas de la zonificación regional y las unidades hídricas fuentes de abastecimiento de acueductos municipales. El cálculo se realizará cada año para condiciones hidrológicas medias y secas.

Este índice fue considerado en la evaluación nacional del agua, ENA, 2010. La metodología detallada se puede consultar en la publicación del Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2010a).

Fuente y disponibilidad de datos

La información básica requerida para el cálculo del IRH y del IUA se presentó en los capítulos temáticos correspondientes de este documento.

Documentación relacionada con el indicador

Estudio Nacional del Agua 2010.

2.3.2. Índice de vulnerabilidad a eventos torrenciales (IVET)

La definición, características y metodología se extractaron del documento “Enfoque conceptual y metodológico para determinar la vulnerabilidad de fuentes abastecedoras de acueductos” (IDEAM, 2011e).

Definición y significado

La vulnerabilidad se expresa en relación con los índices morfométricos de torrencialidad e índice de variabilidad.

- *El Índice morfométrico de torrencialidad* es la relación entre los parámetros morfométricos como el coeficiente de compacidad o de forma, la pendiente media de la cuenca y la densidad de drenaje, los cuales son indicativos de la forma como se concentra la escorrentía, la oportunidad de infiltración, la velocidad y capacidad de arrastre de sedimentos en una cuenca, la eficiencia o rapidez de la escorrentía y de los sedimentos para salir de la cuenca luego de un evento de precipitación y con ello inferir cuál podría ser el nivel de susceptibilidad a procesos torrenciales (Rivas y Soto, 2009).
- *El Índice de variabilidad* muestra el comportamiento de los caudales en una determinada cuenca definiendo una cuenca torrencial como aquella que presenta una mayor variabilidad, es decir, donde existen diferencias grandes entre los caudales mínimos que se presentan y los valores máximos.

Fórmula y unidad de medida del indicador

Una matriz de decisión entre las categorías del índice morfométrico y el índice de variabilidad. La unidad de medida del indicador es cualitativa y se expresa en términos de vulnerabilidad muy alta, alta, media y baja.

Descripción metodológica

El índice morfométrico se constituye en la relación entre las variables morfométricas, como el coeficiente de compacidad o de forma, la pendiente media de la cuenca y la densidad de drenaje, los cuales son indicativos de la forma como se concentra la escorrentía, la oportunidad de infiltración, la velocidad y capacidad de arrastre de sedimentos en una cuenca, la eficiencia o rapidez de la escorrentía y de los sedimentos para salir de la cuenca luego de un evento de precipitación y, con ello, inferir cuál podría ser el nivel de susceptibilidad a procesos torrenciales (Rivas y Soto, 2009).

Se define una serie de valores promedio de las variables indicadas, estableciendo seis categorías o rangos; mientras mayores sean estos valores, hay una mayor tendencia a que en la cuenca se presenten procesos torrenciales, es decir, existe una mayor vulnerabilidad a este tipo de procesos (IDEAM, 2011e). En la Tabla 23 se muestran los rangos de la clasificación de los parámetros mencionados.

Tabla 23. Relaciones para categorizar el índice morfométrico

Índice morfométrico	Escala	Área de la cuenca de drenaje (km ²)	Categorías				
			1	2	3	4	5
Densidad de drenaje (km/km ²)	1:10.000	<15	<1,50	1,51 – 2,00	2,01 – 2,50	2,51 – 3,00	> 3
	1:25.000	16 a 50	<1,20	1,21 – 1,80	1,81 – 2,00	2,01 – 2,50	> 2,5
	1:100.000	>50	<1,00	1,01 – 1,50	1,51 – 2,00	2,01 – 2,50	> 2,5
			Baja	Moderada	Moderada Alta	Alta	Muy Alta
Pendiente media de la cuenca (%)	1:10.000	<15	<20	21 – 35	36 – 50	51 – 75	>75
	1:100.000	>50	<15	16 – 30	30 – 45	46 – 65	>65
			Accidentado	Fuerte	Muy Fuerte	Escarpado	Muy Escarpado
Coeficiente de compacidad			<1,625	1,376 -1,500	1,251- 1,375	1,126 – 1,250	1,00 – 1,125
			Oval-oblonga a rectangular-oblonga	Oval-redonda a oval-oblonga		Casi redonda a oval-redonda	

Fuente: Rivas y Soto (2009).

Las categorías del índice morfométrico que van desde muy alta hasta muy baja, en función de los parámetros pendiente media de la cuenca, densidad de drenaje y coeficiente de forma, se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24. Relaciones entre variables para el índice morfométrico

		Pendiente media de la cuenca					
		1	2	3	4	5	
Densidad de drenaje	1	111	121	131	141	151	1
		112	122	132	142	152	2
		113	123	133	143	153	3
		114	124	134	144	154	4
		115	125	135	145	155	5
	2	211	221	231	241	251	1
		212	222	232	242	252	2
		213	223	233	243	253	3
		214	224	234	244	254	4
		215	225	235	245	255	5
	3	311	321	331	341	351	1
		312	322	332	342	352	2
		313	323	333	343	353	3
		314	324	334	344	354	4
		315	325	335	345	355	5
4	411	421	431	441	451	1	
	412	422	432	442	452	2	
	413	423	433	443	453	3	
	414	424	434	444	454	4	
	415	425	435	445	455	5	
5	511	521	531	541	551	1	
	512	522	532	542	552	2	
	513	523	533	543	553	3	
	514	524	534	544	554	4	
	515	525	535	545	555	5	

■ Muy alta ■ Baja ■ Muy baja
■ Alta ■ Moderada

Fuente: (Rivas y Soto, 2009).

Una condición muy alta para el índice morfométrico corresponde a áreas que se caracterizan por ser inestables y potencialmente inestables, que responden rápida y violentamente a lluvias de alta intensidad y corta duración, generando avenidas torrenciales de forma frecuente.

La categoría alta muestra áreas con una respuesta hidrológica rápida con una cobertura de suelo que permite procesos torrenciales que se presentan frecuentemente en periodos lluviosos. La condición media, en cambio, presenta una respuesta a procesos hidrológicos de moderada a rápida y los eventos se presentan generalmente en las épocas de las mayores precipitaciones al año.

El índice de variabilidad. Se obtiene de la curva de duración de caudales; muestra cómo es la variabilidad de los caudales en una determinada cuenca. Una cuenca torrencial es aquella que presenta una mayor variabilidad, es decir, existen diferencias grandes entre los caudales mínimos y los valores máximos. Cuencas con variabilidades pequeñas muestran que los caudales tienden a mantenerse y los cauces por los que existe flujo, generalmente tienen la capacidad para transportar estos caudales. El comportamiento con variabilidad pequeña es típico de cauces de llanura, los cuales generalmente no presentan procesos torrenciales.

Cuencas de área pequeñas con pendientes altas, por lo general presentan caudales de creciente, alternado de caudales medios y bajos con magnitudes muy inferiores a las de los caudales máximos, que hacen que la curva de duración de caudales muestre una gran variabilidad.

La curva de duración de caudales al ser graficada en escala logarítmica, muestra una tendencia lineal, de la cual se puede obtener el índice de variabilidad que se expresa mediante la siguiente expresión:

$$\text{Índice de variabilidad} = (\text{Log}(Q_i) - \text{Log}(Q_f)) / (\text{Log}(X_i) - \text{Log}(X_f))$$

Ecuación 38

Donde, Q_i y Q_f representan dos caudales tomados de la curva de duración de caudales, y X_i y X_f los porcentajes de tiempo en que se exceden los caudales Q_i y Q_f , respectivamente.

Tabla 25. Clasificación del índice de variabilidad

Índice de variabilidad	Vulnerabilidad
< 10°	Muy baja
10.1° - 37°	Baja
37.1° - 47°	Media
47.1° - 55	Alta
>55°	Muy alta

El índice de vulnerabilidad frente a eventos torrenciales indica la relación existente entre las características de la forma de una cuenca que son indicativos de

la torrencialidad en la misma, en relación con las condiciones hidrológicas en dicha cuenca. La tabla siguiente se muestra la clasificación de la vulnerabilidad frente a eventos torrenciales una vez se estima cada uno de los índices mencionados.

Tabla 26. Clasificación del índice de vulnerabilidad frente a eventos torrenciales (IVET)

Índice de variabilidad	Índice morfométrico de torrencialidad				
	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Muy baja	Baja	Baja	Media	Alta	Alta
Baja	Baja	Media	Media	Alta	Muy alta
Media	Baja	Media	Alta	Alta	Muy alta
Alta	Media	Media	Alta	Muy alta	Muy alta
Muy alta	Media	Alta	Alta	Muy alta	Muy alta

Se expresa en relación con los índices morfométrico y de variabilidad para estimar una sola vulnerabilidad frente a eventos torrenciales, teniendo en cuenta los rangos y las clasificaciones de cada uno de ellos.

Fuente y disponibilidad de datos

Curvas de nivel o modelo digital de elevación del terreno (DEM).; en condiciones generales en el país, la cartografía que se puede obtener se encuentra a escalas 1:100.000, 1:25.000 y en algunos casos a escala 1:10.000. Es importante resaltar que cuencas con áreas pequeñas pueden no quedar bien representadas en cartografía a escala 1:100.000, dado el poco detalle que presentan estas planchas, para lo cual es necesario valerse de herramientas de mejor detalle como puede ser el modelo digital suministrado por la NASA, el cual cuenta con celdas de 30 m de lado, y es una muy buena representación para el territorio colombiano.

Información hidroclimatológica de caudales diarios y de precipitación a nivel diario para estimativos de caudal cuando no se tienen estaciones hidrométricas. En general, esta información corresponde a los registros de lluvia diarios en diferentes estaciones pluviométricas cercanas a la cuenca. Como mínimo, para una determinada cuenca abastecedora, es necesario contar con la información de los datos de lluvias, ya sea dentro de la misma, o en estaciones cercanas con distancias inferiores a 1.0 km. En caso de que se requiera emplear métodos lluvia-caudal, es necesario también tener los datos de temperatura y evaporación a nivel mensual.

Información geológica, geomorfológica, y de cobertura y uso del suelo. Esta información, representada en cartografía, sirve en todo el análisis para establecer las pérdidas por infiltración en la cuenca. A partir de la geología y geomorfología y la cobertura y uso del suelo, se puede tener un estimativo de los coeficientes de escorrentía o números de curva (CN) de la zona de estudio, insumo que

posteriormente junto con toda la información hidroclimatológica analizada permiten obtener los caudales.

Documentación relacionada con el indicador

Estudio Nacional del Agua 2010. Documento enfoque conceptual y metodológico para determinar la vulnerabilidad de fuentes abastecedoras de acueductos (IDEAM, 2011e).

2.3.3. Índice de agua subterránea para abastecimiento público con respecto al número de habitantes (IASAP)

Definición y significado del indicador

El indicador permite reconocer el uso que se hace del agua subterránea para abastecimiento público per cápita (Unesco et ál., 2007).

Fórmula y unidad de medida del indicador

Se calcula a partir de la ecuación 39.

$$\text{IASAP} = \frac{\text{Agua subterránea para abastecimiento público}}{\text{Número de habitantes}}$$

Ecuación 39

Descripción metodológica

Las variables y limitaciones ya han sido definidas en los anteriores indicadores

Periodicidad de actualización

El indicador se actualizará anualmente

Procedimiento para espacialización de los indicadores hídricos regionales

Finalmente, en la Figura 68 se resume la información geográfica que debe ser tomada en cuenta para espacializar los diferentes indicadores hídricos.

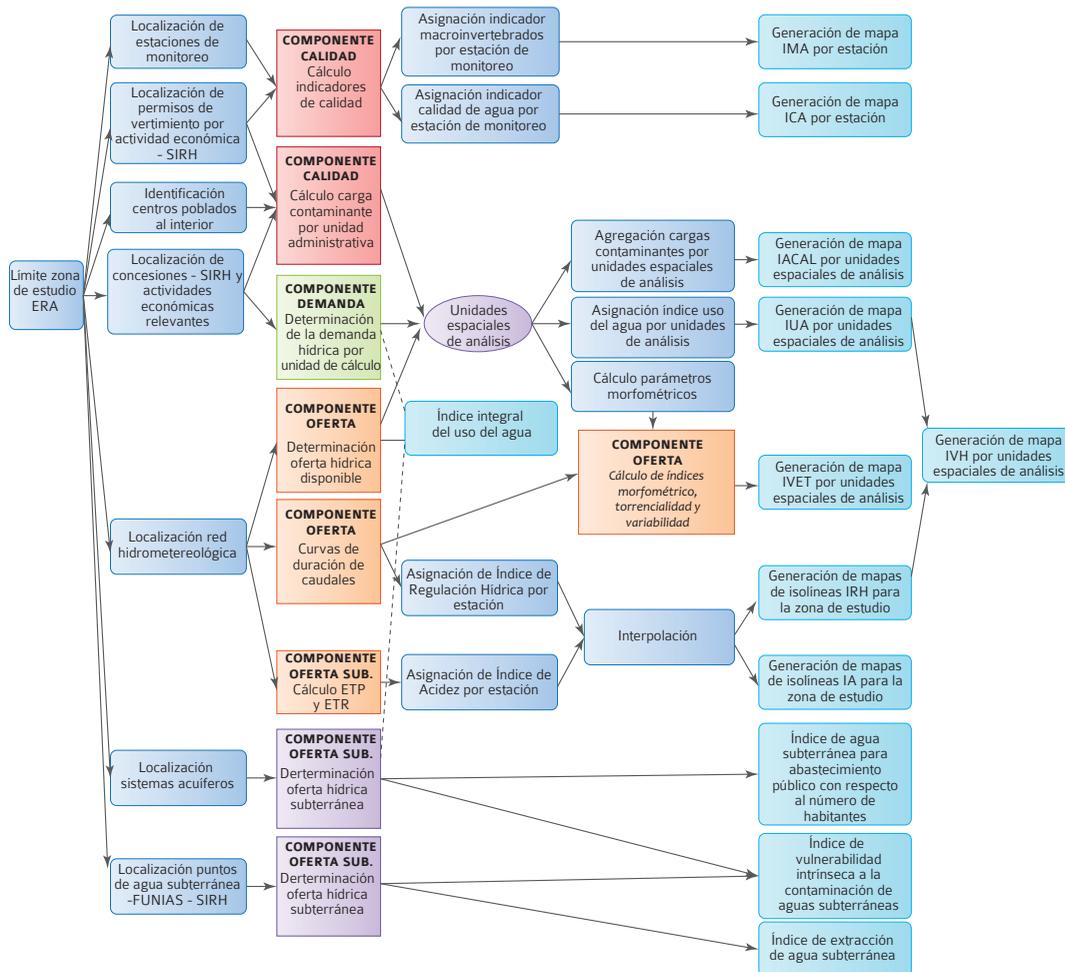


Figura 68. Espacialización de Indicadores Hídricos Regionales





PARTE IV

Estrategia para la implementación
de la **era** en las autoridades
ambientales

La integración de la información relacionada con el agua en el marco de la GIRH supone un esfuerzo institucional que propicie el desarrollo del Sistema de Información Regional del Recurso Hídrico (SIRH), en el cual se puedan disponer las diferentes capas de información para el análisis integral multipropósito.

Esta iniciativa, permite homogeneizar la información atendiendo estándares y protocolos y garantizar un escenario de evaluación creciente que supere los desarrollos dispersos que se tienen sobre el tema para atender cada plan o cada actividad de los planes de gestión y operación de las autoridades ambientales. Desde luego, y tal como se ha ilustrado ampliamente en capítulos anteriores, constituye la línea base de las autoridades ambientales que permite realizar cortes periódicos en informes de Estudios Regionales del Agua para presentar el estado, presiones, dinámica y proyecciones del agua en las unidades de análisis definidas por la autoridad ambiental.

La propuesta reconoce los avances realizados en el tema y pretende que se integren y formen parte del SIRH. En este sentido, se requerirá desarrollar unas fases que en cada corporación, autoridad ambiental urbana o de parques nacionales (autoridades ambientales) tienen alcance y requerimientos diferentes en función a la organización y funcionalidad de sus productos temáticos, equipo de trabajo y recursos dispuestos para la gestión del agua. En este capítulo se formula una estrategia general y se describen las fases que podrían ser desarrolladas para cumplir con el fin de las ERA. En términos generales, se requiere de la autoridad ambiental para la implementación de las ERA:

- **Consolidación de marcos conceptuales y metodológicos de la GIRH**

Se sugiere la elaboración de un documento maestro que sirva de guía a los funcionarios y contratistas de las autoridades ambientales y actores del agua en las unidades de análisis hidrológico de las áreas de jurisdicción, con los lineamientos, premisas, conceptos y metodologías para la implementación de las ERA en el marco de la GIRH y de los lineamientos conceptuales y metodológicos entregados en este documento, en el marco del Decreto 1640 de 2012.

- **Diseño de una ruta crítica para la implementación de las ERA**

La ruta crítica debe fundamentarse en un diagnóstico del estado de la evaluación del agua en las diferentes unidades de análisis que permita priorizar acciones con base en un análisis de debilidades, oportunidades, amenazas y fortalezas.

Este análisis situacional permitirá diseñar una matriz de marco lógico para formular indicadores de logro y desempeño que permitan hacer un seguimiento a la eficiencia y eficacia de medidas institucionales para obtener resultados que se reflejen en la consolidación de un SIRH regional dinámico del que se pueda derivar una línea base para los diferentes ejercicios de la autoridad ambiental cuando sea requerida. La matriz de marco lógico debe incluir plan operativo,

cronograma y estimación de inversiones requeridas en el corto, mediano y largo plazo para la implementación del modelo de ERA.

- **Sistema de Información del Recurso Hídrico SIRH, componente regional**

Este sistema incluye los protocolos, estándares y reglas de juego para el manejo y organización de la información del agua en la toma de decisiones. Comprende los módulos temáticos de oferta, demanda, calidad y riesgo hidrológico y los correspondientes al seguimiento de la gestión.

La implementación del SIRH comprende el desarrollo de aplicativos que permitan almacenar, procesar y generar reportes de las variables e indicadores del agua en tiempo real. En este sentido, debe estar habilitado para generar reportes a los usuarios en formas de presentación acordadas por la autoridad ambiental.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) formarán parte del Sistema de Información Regional de Recurso Hídrico y tendrán sus protocolos propios en los cuales se dé cuenta de la estructura y estándares de la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE), sistemas de coordenadas, cartografías base, escalas de trabajo y resolución espacial para los diferentes componentes, protocolos para la gestión documental (diccionarios de datos, metadatos), Modelo Digital de Terreno, unidades de análisis y bases de datos estructuradas.

- **Escenarios de trabajo en la consolidación de información para SIRH, componente regional**

De acuerdo con sondeos realizados en las autoridades ambientales, estas se encuentran básicamente en dos situaciones:

Autoridades ambientales con sistemas de información que soportan procesos administrativos y técnicos de la entidad, donde, en muchos casos el levantamiento de datos se acoge a formatos y periodicidades formalizados dentro de los sistemas de gestión de calidad. Este tipo de entidades debe hacer una revisión de sus sistemas y hacer una comparación en cuanto al tipo, formato, número de atributos que coinciden con el modelo de datos del SIRH y opciones de clasificación de la información, de forma que puedan establecer los ajustes que sean requeridos para reportar información al IDEAM a través de *web services*.

Autoridades ambientales que adelantan sus tareas de recopilación de información en diferentes instrumentos con diferentes niveles de sistematización. Estas entidades se enfrentan a un reto mayor pues deben iniciar el diseño de su sistema y el establecimiento de procedimientos que fortalezcan la gestión de información en su entidad, con el desarrollo de actividades relacionadas con la manipulación de datos desde su planeación hasta su difusión. Es indispensable el establecimiento de políticas o lineamientos de gestión que busquen asegurar el cumplimiento de la normatividad existente, adelantar tareas de

documentación de datos y compilación de metadatos, tareas para garantizar la calidad, estandarización, armonización, el control del ciclo de vida y, finalmente facilitar el acceso, la difusión y auditoría.

- **Protocolos y procedimientos**

Aunque forman parte del componente regional del SIRH, merecen especial dedicación, puesto que de estos protocolos y procedimientos depende la calidad de información de que se dispone. Es pertinente, por lo tanto, contar con protocolos, manuales de procedimiento y documentación para cada proceso identificado en la construcción de las ERA. Estos instrumentos deben estar dispuestos en la web de la autoridad ambiental para la permanente consulta de los usuarios. Merece especial atención el tema de los laboratorios, los cuales deben ser acreditados y fortalecidos con ejercicios de intercalibración para garantizar la calidad de sus resultados.

- **Sistema de indicadores hídricos regionales**

La autoridad ambiental debe reportar periódicamente el estado y dinámica del agua, las afectaciones por presión de la demanda o alteraciones de la calidad y los escenarios de riesgo hidrológico. Este reporte corresponde a indicadores que requieren medición de variables en puntos de monitoreo que la autoridad ambiental debe definir para cada componente en ejercicio de su función. Los indicadores e índices de estado y gestión deben ser generados a partir del sistema de información, con datos previamente homogeneizados, estandarizados y validados.

Cada indicador o índice debe contar con una hoja metodológica en la cual se identifique y defina el indicador, propósito, pertinencia, su unidad de medida, periodicidad, cobertura geográfica, disponibilidad de los datos, metodología de cálculo, frecuencia de medición, fuentes de datos, descripción de variables, formas de presentación de los resultados, responsables de su obtención y limitaciones del indicador. Sobre un buen sistema de indicadores, tanto de estado como de gestión, gravitará la eficacia de la gestión.

- **Programa de Monitoreo Regional**

La autoridad ambiental debe contar con un Programa de Monitoreo Regional con propósitos y alcances claros. Este sistema debe articularse al Programa Nacional de Monitoreo que lidera el IDEAM para dar cumplimiento a la PNGIRH. El diseño de esta red de medición obedecerá a criterios técnicos que permiten definir la densidad de estaciones y las variables a medir en cada estación.

El programa incluye puntos de observación que para muchas variables requerirán de infraestructura especial para la instalación de instrumentos de medición, sensores y dispositivos de transmisión de datos. Adicionalmente, requieren de mantenimiento para que cumplan con los protocolos dispuestos por los organismos que se ocupan de fijar normas técnicas para la obtención y

procesamiento de la información como la Organización Meteorológica Mundial, que genera guías, normas y protocolos técnicos.

- **Equipamiento mínimo**

La obtención de datos para la GIRH requiere de un equipamiento mínimo que la autoridad ambiental debe disponer para atender sus necesidades. Estos equipos dependerán de los objetivos de su gestión y particularidades regionales, pero siempre se requerirán equipos de medición de caudales para la realización de aforos en grandes corrientes y quebradas, equipos multiparámetros e instrumentos para variables de calidad (peachímetro, conductímetro, etc.), sondas para medición de niveles, *bailers*, transductores de presión, GPS, recipientes para toma de muestras, reactivos, etc.

- **Fortalecimiento del talento humano**

Este tema es muy sensible y es la autoridad ambiental quien debe dimensionar sus necesidades de talento humano para satisfacer los requerimientos de la GIRH.

No obstante, hay dos sugerencias para el mejoramiento de las funciones de evaluación y gestión del recurso hídrico:

- » Contratación de personal técnico y profesional idóneo para la GIRH.

Este tema ha suscitado controversias que finalmente llevan a concluir que se requiere contar en los equipos de trabajo relacionados con la evaluación y la gestión del agua con personal del nivel técnico y profesional de las ciencias naturales, las ciencias humanas, las ciencias económicas y la ingeniería cuando menos. Es deseable que estos equipos de trabajo cuenten con profesionales formados y experimentados en las áreas de hidrología, economía, saneamiento, química y bioindicadores, trabajo y proyección social, desarrolladores de sistemas y en SIG. En el nivel técnico o tecnológico se requieren profesionales con habilidades para monitoreo físico-químico y biológico, manejo de información, operación y mantenimiento de equipos. La evaluación del subsistema hidrogeológico necesariamente debe estar a cargo de un hidrogeólogo o un geólogo con formación y experiencia en el tema de evaluación y gestión de las aguas subterráneas.

- » Capacitación permanente

El equipo de trabajo para la implementación de las ERA debe capacitarse permanentemente en los temas que se identifiquen y prioricen en la autoridad ambiental; estos programas de capacitación deben extenderse a técnicos, profesionales tanto de planta como contratistas. La capacitación puede ser programada con cursos de extensión con apoyo de universidades y expertos regionales o nacionales, seminarios, diplomados, cursos cortos, plataformas virtuales y entrenamientos permanentes.

- **Difusión y comunicación**

Como parte del fortalecimiento de la gobernanza y la gobernabilidad, es necesario difundir y comunicar los resultados. En este sentido, se sugieren varios mecanismos:

- » Estudios Regionales del Agua

La ERA debe verse reflejada en actualizaciones permanentes que den cuenta del estado, dinámica y afectaciones del recurso hídrico por presiones de uso e impactos de actividades económicas. La actualización se realizará en temas de oferta, demanda, calidad y riesgo que se soportan en análisis integrados de productos temáticos y, particularmente, en la representación de índices e indicadores en los cuales pueda visibilizarse la evolución de las variables y el impacto de los planes, acciones e inversiones en las diferentes unidades de análisis de las áreas de jurisdicción de las autoridades ambientales.

El contenido de estos ERA debe dar cuenta de la oferta (comportamiento de niveles, caudales, sedimentos, variabilidad de la escorrentía, balances hídricos actualizados por unidad hidrográfica de análisis, dinámica de la recarga y condiciones de flujo de las aguas subterráneas, actualizaciones del modelo hidrogeológico conceptual), demanda (estadísticas actualizadas de uso por sectores y proyecciones de demanda, estadísticas de uso de las aguas subterráneas), calidad (comportamiento y tendencias de facies y variables hidroquímicas e hidrogeoquímicas y evaluación de escenarios de demanda), riesgo (escenarios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por inundaciones, sequías, variabilidad climática, fenómenos extremos y cambio climático) y síntesis regional en indicadores de estado y gestión. Los estudios deben ser presentados con su marco conceptual y metodológico de tal manera que se pueda reconocer la coherencia y pertinencia de los resultados. Es necesario, que se reconozcan en el texto los referentes metodológicos, resultados, análisis y discusión de resultados y retos de la GIRH, en el área de jurisdicción de las autoridades ambientales. Los productos que se presenten ya sean tablas, gráficas, resultados de modelación matemática o modelamientos espaciales en SIG deben ser generados del SIRH regional y encontrarse disponibles en las páginas web.

- » Diseño de cartillas y material didáctico

Esta tarea es importante para alcanzar un grado de empoderamiento y reconocimiento de las comunidades y sectores económicos en el marco de la GIRH. Los profesionales de las ciencias humanas y comunicadores sociales juegan un importante papel en el diseño de estas herramientas que propician lenguajes integradores para facilitar diálogos y acuerdos con actores para una adecuada GIRH.

- » Talleres con la comunidad.
Los eventos con la comunidad tienen fines de capacitación, difusión, comunicación y socialización de avances en las ERA, y se pueden realizar en los eventos programados en el marco de la formulación e implementación de los diferentes planes como los POMCA.

- **Estrategia de investigación y conocimiento**

Es importante definir las prioridades de investigación y conocimiento sobre temas del agua en las unidades de análisis del área de jurisdicción de las autoridades ambientales. Esta priorización debe referenciar una agenda de cooperación y articulación técnico-científica con universidades y centros de investigación regionales, nacionales e internacionales.

Las acciones definidas y desarrolladas como parte de la estrategia de investigación de los componentes necesarios para consolidar las ERA permitirán afianzar conocimientos para una adecuada toma de decisiones.

En la Tabla 27 se presenta la secuencia de pasos que podrían adelantarse como parte de esta estrategia.

Tabla 27. Pasos para la implementación de las ERA en las autoridades ambientales

EVALUACIONES REGIONALES DEL AGUA IMPLEMENTACIÓN	
FASES	ACTIVIDADES
Elaboración del marco conceptual y metodológico de las ERA en el área de jurisdicción de la autoridad ambiental	Elaboración de documento maestro
Elaboración de ruta crítica para la consolidación de las ERA y el SIRH Componente regional	Análisis situacional y diseño de matriz de marco lógico con plan operativo, cronograma y estimación de inversiones requeridas en el corto, mediano y largo plazo para la implementación del modelo de ERA
Plataforma técnica para las ERA de la corporación	Adaptar y generar protocolos, estándares y procedimientos
	Construir o ajustar la estructura del Sistema de Información Regional del Recurso Hídrico (bases de datos, SIG, web, etc.) en concordancia con el SIRH
	Diseño de estrategia para implementación de indicadores hídricos regionales
	Articulación de instrumentos de evaluación y gestión del recurso hídrico en las unidades de análisis del área de jurisdicción
	Diseño de la red de monitoreo del agua en cantidad, calidad, sedimentos y sistema de alerta temprana
Fortalecimiento institucional para las ERA	Diseño del marco estadístico para la integración y sistematización de información asociada a los temas de demanda, calidad, riesgo e indicadores
	Implementar la estrategia de capacitación y entrenamiento de personal para los temas y procedimientos de las ERA
	Conformación de grupos interdisciplinarios para las ERA (planta y contrato)
	Identificación y definición de acciones para suplir la infraestructura técnica de soporte para la ERA
	Elaborar estrategia de investigación y conocimiento
	Diseño e implementación de estrategia de difusión y comunicación

Sin embargo, es importante resaltar que es la autoridad ambiental quien define su estrategia para la implementación de las ERA atendiendo a los requerimientos jurídico-institucionales para hacer una adecuada GIRH en el marco de la PNGIRH.

Finalmente, es definitivo entender que los espacios y escenarios de encuentro que propone la PNGIRH solo son posibles sobre la base de una construcción de acuerdos institucionales la evaluación del recurso hídrico en torno a, que se asocia con el tema del manejo de la información y el conocimiento como eje para la GIRH. De otra manera, tendremos una Torre de Babel en la gestión del agua donde no es posible integrar y compartir de manera transparente la información, pues los marcos conceptuales y metodológicos no son coherentes y compatibles. En este trágico escenario, la gestión es dispersa y es necesario reconstruir líneas base particulares para cada uno de los muchos planes e instrumentos que se requieren para la gestión del agua en las corporaciones. La PNGIRH colapsaría por el peso y los volúmenes de información que, de no ser ordenados, sistematizados y validados, pueden sepultar la intención de alcanzar un SIRH útil a todos los niveles. La fortaleza de los ERA se reconoce en los principios que rigen el paradigma de la GIRH, su potencialización dependerá de su replicabilidad y trazabilidad en las autoridades ambientales.

Referencias bibliográficas

Aguilera, S. Elvin (2010). Análisis Regional de Crecidas Máximas para Honduras. Guatemala.

Anón (1977). Hydrogeological maps. In Unesco y WMO (Eds.), A contribution to the International Hydrological Studies and Decade Reports in Hydrology (Vol. 14).

Anón (1983). International Legend for Hydrogeological Maps. Unesco. Technical Document. SC-84/WS/8. Paris.

Aparicio, F. (1992). Fundamentos de Hidrología de Superficie. Mexico: Limusa.

Barceló (2003). Contaminación y calidad química del agua: el problema de los contaminantes emergentes. From [http://bases.cortesaragon.es/bases/ndocumenviii.nsf/03fdeeedfaf2d93dc1256c8d002bc928/c4da3fc84fb25b1ac125792d003a19c2/\\$file/docfundacion.pdf](http://bases.cortesaragon.es/bases/ndocumenviii.nsf/03fdeeedfaf2d93dc1256c8d002bc928/c4da3fc84fb25b1ac125792d003a19c2/$file/docfundacion.pdf)

Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C., y Martínez, J. F. (2007). Colombian sedimentary basins: nomenclature, boundaries and petroleum geology, a new proposal. Bogotá, Colombia: Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). from <http://www.anh.gov.co/es/index.php?id=25>

Campillo, A. (2012). Orígenes de la Recarga de los Acuíferos del Valle de Aburrá: Enfoque Geoquímico e Isotópico. Informe para optar título de Máster de Investigación en Agua y Medio Ambiente, Universidad Montpellier II. pp. 53.

Carrillo, J. y otros (2007). Response of the interaction between groundwater and other components of the environment in Mexico. Environmental Geology.

Castany, G. (1967). Exploitation des eaux souterraines et bilan hydrique dans les calcaires de Tunisie. AIH y Unesco (Eds.).

Chow, V. T., Maidment, D., y Mays, L. (1994). Hidrología Aplicada: Mc GrawHill.

Collins A.L. y Walling, D.E. (2004). Documenting catchment suspended sediment sources: problems, approaches and prospects. Progress in Physical Geography 28,2 (2004) p. 164. SAGE Publications.

Contreras C. (2013). Los sedimentos en los estudios regionales del agua. IDEAM – Subdirección de Hidrología. Documento en construcción, [sin publicar].

- Custodio, E. y Llamas, R. (1996). Hidrología subterránea. Barcelona, Omega.
- Custodio, E.; Llamas, M.R.; Sauquillo, A. (2000). Retos de la hidrología subterránea. En: Ingeniería del Agua. Vol 7. N° 1: Mar. 2000.
- Custodio, E. y Llamas, M. (2001). Hidrología Subterránea. (2 tomos). Omega, 2350 pp.
- CVC, Universidad del Valle (s.f.). Modelación Matemática el río Cauca. Capítulo 7. Modelación de calidad del agua. <http://www.cvc.gov.co/cvc/Mosaic/dpdf1/volumen8/7-modelacioncarcv8f1.pdf>
- Delgadillo S. Alejandro y Moreno B. Ada. Hidrología. Morfometría de Cuencas. Disponible en <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/adamoren/HIDRO/MORFOMETR%CDA%20DE%20CUENCAS.pdf>
- Directiva Marco del Agua (2000) UE. Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo por el cual se establece el marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.
- DNP (2009). Consolidación de la política nacional de información geográfica y la infraestructura colombiana de datos espaciales (ICDE). Documento Conpes 3585 - Consejo Nacional de Política Económica y Social República de Colombia. Disponible en www.dnp.gov.co/CONPES/DocumentosConpes/ConpesEconomicos/2009.aspx
- Ecopetrol (2000). Atlas of sedimentary basins and petroleum geology of Colombia [Atlas Digital]. Disponible en www.accefyn.org.co/revista/volumen33/126/37-43.pdf
- EPA (1985). Grounwater Monitoring Strategy. Washington: U.S. Enviromental Protection Agency.
- Erazo, A. (2004). Regionalización de Caudales Máximos y Medios en El Salvador. San Salvador.
- Everett, L. (1983). Groundwater Moniotoring. New York: General Electric Company.
- Falkenmark. (2003). GWP.
- Freeze, R. A., and Cherry, J. A. (1979). "Groundwater", Prentice-Hall, Inc., EnglewoodCliffs, NJ.
- Fitts, C. R., Ed. (2002). Groundwater science. London, Elsevier Science.
- Foster, S. (1989). Monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas. Una evaluación de métodos y costos. CEPIS, BGS, OMS, OPS.
- Foster, S. y Hirata, R. (1987). Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas: una metodología basada en datos existentes. PAHO, OPS-CEPIS.

Foster, S. y Otros (2006). Serie de notas informativas del GW-Mate. In BM & DFID (Eds).

García, M. (2010). Evaluación general de los aportes de agua del páramo al abastecimiento de la población y actividades productivas en Colombia, Informe Final. Contrato con Instituto Humboldt. [Sin publicar].

Ghetti, P.F. y Bonazzi, G. (1981). I macroinvertebrati nella sorveglianza ecologica dei corsi d'acqua. Collana del Progetto Finalizzato. Promozione della Qualità dell'Ambiente, CNR AQ/1/127, 181 p.

GreenFacts (2011). Glosario. Disponible en www.greenfacts.org/es/glosario/pqrs/regimen-agua

GWP (2000). "Gestión Integrada de los Recursos Hídricos". Disponible en <http://www.la-wetnet.org/lasmiradasdelagua/descargas/GIRH.pdf>

Heras, R. (1976). Hidrología y Recursos Hidráulicos. Dirección general de obras hidráulicas, Centro de Estudios Hidrográficos. Madrid.

Hernández, J. y Montaner, D. (2008). Manual ARCGIS 9.2. Disponible en www.gep.uchile.cl/publicaciones/libro_tutorial_deArcGis_9.2.pdf

IAH (1995). Hydrogeological Maps: A Guideline and Standard Leyend, Preparado con la colaboración de miembros de IAH/IAHS/IHP con financiamiento de Unesco.

IHP- Project M-1.3 (Vol. 17). Hannover: Verlag Heinz Heise.

IAH (2002). Groundwater recharge. Hydrogeology Journal, 10(1).

IDEAM (1998). El Medio Ambiente en Colombia. Bogotá, D.C.

IDEAM (2002a). Perfil del Estado de los Recursos Naturales y del Medio Ambiente en Colombia 2001. Bogotá, D. C.

IDEAM (2002b). Protocolo para el monitoreo de los vertimientos en aguas superficiales y subterráneas. Bogotá, D. C.

IDEAM (2004). Guía para el monitoreo y el seguimiento del agua. Bogotá, D. C.

IDEAM (2005). Atlas Climatológico de Colombia, elaborado por la Subdirección de Meteorología del IDEAM. Bogotá, D. C.

IDEAM (2006). Guía y protocolos del monitoreo y seguimiento del agua. Informe final Contrato de servicios de Consultoría C-0427 -05, Sánchez F. Bogotá.

IDEAM (2007). Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento del Agua. IDEAM, Imprenta Nacional de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. <https://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/021172/Protocoloparaelmonitoreoyseguimientodelagua.pdf>

IDEAM (2010a). Estudio Nacional del Agua 2010. Bogotá D. C.: Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales.

IDEAM (2011a). Lineamientos técnicos para la guía nacional de modelación del recurso hídrico - componente agua superficial continental. Documento Técnico. Bogotá D. C.

IDEAM (2011b). Memorias taller regional para la construcción de estudios regionales del agua e incorporación del índice de uso de agua en la tasa por uso. Convenio 015/2011 MAVDT-IDEAM. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) Subdirección de Hidrología. Barranquilla, septiembre 21 y 22 de 2011.

IDEAM (2011c). Memorias taller regional para la construcción de estudios regionales del agua e incorporación del índice de uso de agua en la tasa por uso, Convenio 015/2011 MAVDT-IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) Subdirección de Hidrología. Cali, septiembre 14 y 15 de 2011.

IDEAM (2011d). Memorias taller regional para la construcción de estudios regionales del agua e incorporación del índice de uso de agua en la tasa por uso. Bogotá. In M. y. E. A.-I.-S. d. H. Convenio 015/2011 MAVDT-IDEAM. Instituto de Hidrología (Ed.). Bogotá, septiembre 28 y 29 de 2011.

IDEAM (2011e). Proyecto vulnerabilidad de las fuentes abastecedoras de acueductos Contrato N° 077 2011 suscrito entre IDEAM y Renny Balanta Murcia.

IDEAM (2012). Criterios para identificar y delimitar las zonas inundables a escala 1:25000. [No publicado].

IDEAM y Caicedo, F. (2011). Modelación de la vulnerabilidad por zonas hidrográficas del recurso hídrico ante los efectos de la variabilidad y cambio climático. Informe final de contrato con el IDEAM.

IDEAM e IGAC (2010). Red Hidrográfica de Colombia (Cuencas). Cartografía realizada en desarrollo del Convenio N° 010-2009 IDEAM - IGAC y del Convenio N° 4051-2009 IGAC - IDEAM. Escala 1:500.000: Cartografía realizada en desarrollo del Convenio N° 010-2009 IDEAM - IGAC y del Convenio N° 4051-2009 IGAC - IDEAM. Escala 1:500.000.

IDEAM y MAVDT (2010b). Ajuste del programa nacional de monitoreo del recurso hídrico y la determinación de la estrategia de su implementación respondiendo a los indicadores ambientales de seguimiento del recurso hídrico y un estudio de reingeniería de la red, el cual debe definir la red básica nacional para el monitoreo del recurso hídrico y las necesidades de infraestructura para llevar a cabo su implementación (Vol. 1). Bogotá D. C.: Contrato 214 de 2010, Informe Final, elaborado por EPAM s.a esp. Bogotá D. C.

IDEAM y MAVDT (2011 a). Registro de Usuarios del Recurso Hídrico- FRURH”, Quinto Informe Contractual – Convenio No. 06/2010. Bogotá D. C.: Producto Documento Registro de Usuarios del Recurso Hídrico.

IDEAM y MAVDT (2011 b). Sistema de Información del Recurso Hídrico”, Quinto Informe Contractual – Convenio No. 06/2010. Bogotá D. C.: Producto Documento Sistema de Información del Recurso Hídrico.

IDEAM y UN (2011). Criterios metodológicos mínimos para la elaboración e interpretación cartográfica de zonificaciones de amenaza por inundaciones fluviales para el territorio colombiano con una aplicación práctica de dos áreas piloto (Inundaciones lentas y súbitas) Fase I. Informe final de contrato con el IDEAM. Bogotá D. C.

IGAC (2005). Resolución 068 de 2005.

IGAC (2010a). http://www.icde.org.co/web/guest/datos_fundamentales_gi

IGAC (2010b). Plan estratégico nacional de producción, acceso, uso y gestión de información geográfica Infraestructura colombiana de datos espaciales.

IGAC (2011). Disponible en <http://www.igac.gov.co:10040/wps/wcm/connect/Web+-+Areas+Estrategicas/Areas+Estrategicas/Areas+Estrategicas/Subdireccion+de+Geografia+y+Cartografia/Formatos+y+Escalas+de+Mapas/FormatosyEscalas+deMapas>

IGME (1995) Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España. Instituto Geológico y Minero de España. (IGME). Recuperado en <http://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/lib43.htm> (3 de septiembre de 2011).

Ingeominas (2000a). Atlas Geológico de Colombia. Escala 1:500.000. Memoria Explicativa. Bogotá D. C.

Ingeominas (2000b). Atlas Hidrogeológico de Colombia. Escala 1:500.000. Bogotá.

ITGE. (1971). Programa Nacional de Investigación Minera. Mapa hidrogeológico de España. Escala 1:50.000. Disponible en: http://aguas.igme.es/igme/publica/libros2_TH/libro31/pdf/lib31/1_int.pdf

ITGE (1987). Mapa de normas de explotación de acuíferos. Escala 1:50000. Madrid., Disponible en http://aguas.igme.es/igme/publica/libros2_TH/libro31/pdf/lib31/1_int.pdf

Linsley, R., Kohler, M. y Paulhus, J. (1977). Hidrología para Ingenieros. Mc Graw –Hill Latinoamericana. México D. F.

Lerner R, D.N.; A.S.; Simmers, I. (1990).; Groundwater recharge. A guide to understanding the natural recharge. Hannover: Ed. R. van Acken GmbH, 1990. 345p.

La Contaminación del Agua. Disponible en http://130.206.170.118/servlet/SBReadResourceServlet?rid=1225108636975_1215147026_697&partName=htmltext

Ley 388 (1997). Por la cual se modifica la Ley 9 de 1989, y la Ley 2 de 1991 y se dictan otras disposiciones, from <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=339>

Ley de Aguas (2005). España.

Libro Blanco. Evaluación de la calidad de agua (Libro Blanco de España, cap. 3 numeral 3.1. La calidad de las aguas. España.

López-Geta, J. A., Fornés Ascoiti, J. M., Ramos González, G. y Villarroja Gil, F. (2009). Aguas Subterráneas, un recurso natural del subsuelo. Madrid, Instituto Minero y Geológico de España.

MADS (2013). Grupo de investigación en gestión de agro ecosistemas, tropicales, andinos, Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia.

Maldonado A., Zuemmy C. (s.f.). Clasificación del río Sonora tramo Mazocahui-presa. Rodríguez A, Capítulo 5. Capacidad de asimilación. [Tesis]. Disponible en <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/5404/Capitulo5.pdf>

MAVDT (2000). Resolución 1096 Por la cual se adopta el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS. En: www.cra.gov.co.

MAVDT (2002). Evaluación Nacional al Programa de Tasas Retributivas por Vertimientos Puntuales. Bogotá D. C.

MAVDT y Vargas, C. (2010). Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. Viceministerio de Ambiente. Bogotá D. C.

MAVDT (2010b). Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, Viceministerio de Ambiente Dirección de Ecosistemas (pp. 124). Bogotá D. C.

MAVDT (2010c). Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación. Bogotá D. C.

MAVDT (2011). Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos, Contrato de consultoría N° 198 de 2010. María Victoria Vélez - Grupo de Recurso Hídrico. Programa de Inversión para el Desarrollo Sostenible IDS. [En revision]. Bogotá D. C.

Martínez y Fernández (2006). Régimen de caudales: definición de estatus hidrológico y valoración de la alteración. Presentado en III Congreso de Ingeniería, Territorio y Medio Ambiente. Disponible en www.ciccp.es/biblio_digital/lcitema_III/congreso/pdf/010409.pdf.

Mazor, E. (2004). Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology. Marcel Decker. New York. 453 pp

Meybeck, M., y Helmer, R. (1989). The quality of rivers: from pristine state to global pollution. Paleogeog. Paleoclimat. Paleoecol. Global Planet. Change Sect, 75, 283-309.

Ministerio de la Producción, Viceministerio de Pesquería Perú, (2004). Piscicultura de la Trucha.

Monsalve, G. (2009). Hidrología en la Ingeniería (7 ed.). Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Muñoz, J. L. (2002). Aplicación de los modelos matemáticos de flujo y transporte de contaminantes para el diseño de sistemas de remediación. Disponible en <http://aguas.igme.es/igme/publica/pdf/lib15/034.pdf>

OECD (2001). Environmental Indicators. Towards Sustainable Development Libro Blanco. Evaluación de la calidad de agua (Libro Blanco de España, cap. 3, numeral 3.1) La calidad de las aguas. España.

OMM-N° 168 (2011): Guía de prácticas hidrológicas. Volumen I. Hidrología. De la medición a la información Hidrológica. Disponible en www.whycos.org/hwrrp/guide/index_es.php.

OMM (1994). Guía de Prácticas Hidrológicas. N°68 (5 ed.).

Pérez, D. (1995). Hidráulica de las captaciones de aguas subterráneas: un enfoque no lineal. La Habana.

Rivas, y Soto (2009). Determinación de niveles de potencialidad torrencial de la cuenca del río Mocotíes, Mérida, Venezuela. *Revista Forestal Venezolana*, Año XLII, Volumen 53(1) Enero-junio, 2009, pp. 33-4.

Roldan, G. (2003). Bioindicación de la calidad del agua en Colombia Uso del método BMWP/Col. Medellín. 170 p.

Sánchez, F. D. (2006). Informe final contrato n°. 214 de 2010 del contrato n°. C-0427-05 (numeración IDEAM). *Guía y Protocolos del Monitoreo y Seguimiento del Agua*, 454p. [CD ROM]. Anexo 2. Guía y protocolos de calidad del agua, p. 28-48. Metodologías analíticas p. 28-223.

Samper, F. J. (1997). Evaluación de la recarga a partir de modelos numéricos de flujo en acuíferos. En: *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica*. Madrid.

Scanlon, B.R.; Healy, P.G.; Cook (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. En: *Hydrogeology Journal*, (10: 18-39).

SDA (2009). Estándares de información geográfica para la SDA versión I. Bogotá D. C.: Dirección de planeación y sistemas de información ambiental.

Shen, H. W. y Hung, C.S. (1972). An engineering approach to total bed-materialload by regression analysis. En: Shen, H.W. (Ed): *Sedimentation (Eisntein Symposium)*, 14-17 .

SIAC. <http://www.siac.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=701&conID=306>

Stanescu, S. (1969). Apuntes de clase para el curso de hidrología práctica (parte I), Publicación Aperiódica No. 24. Bogotá D. C.: HIMAT.

Struckmeir, W., y Marat, J. (1995). Hydrogeological Maps: A Guideline and Standard Leyend. In IAH, IAHS, IHP & Unesco (Eds.), Project M-1.3. Hannover.: Verlag Heinz Heise.

Tate, D. M. Principles of water use efficiency In: Principles of water use efficiency. Disponible en [/www.bvsde.paho.org/muwww/fulltext/repind48/principles/principles.html](http://www.bvsde.paho.org/muwww/fulltext/repind48/principles/principles.html)

Timlim, R., y Everett, L. (1978). Establishment of Groundwater Quality Monitoring Programmes. Paper presented at the Symposium of the American Water Resources Association, Mineapolis. USA.

Todd, D. K. y Mays, L. W. (2005). *GroundwaterHydrology*, Wiley.

Tóth, J. (1995). Hydraulic continuity in large sedimentary basins. *Hydrogeology Journal*, 3(4), 4-16.

Tucci C.M. (1993). "Escoamento em rios e reservatorios", Cap 12, Hidrologia, ciencia e aplicacao. Editorial Universidad de Sao Paulo Brasil.

UE (2007). Protección y gestión del agua (Directiva marco sobre el agua). Unión Europea. Disponible en: http://europa.eu/legislation_summaries/agriculture/environment/l28002b_es.htm

UNAM (2009). Contaminantes emergentes en el agua. Revista Digital, Vol.10 (8). Disponible en <http://www.revista.unam.mx/vol.10/num8/art54/int54.htm>

Unesco (1981). Métodos de Cálculo del Balance Hídrico. Guía Internacional de Investigación y Métodos. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. España. Disponible en: <http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001377/137771so.pdf>

Unesco (2004). Curso Manual Tutorial de Ensayos de Bombeo de Acuíferos. Disponible en: www.unesco.org/uy/phi/libros/libroPIEB/2-2.html

Unesco (2006a). 2º Informe sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos del Mundo: "El Agua una responsabilidad compartida". Disponible en www.unesdoc.unesco.org/images/0014/001144409s.pdf

Unesco (2006b). Documento Técnico del PHI-LAC, N° 4. Evaluación de los recursos hídricos. Elaboración del balance hídrico integrado por cuencas hidrográficas, Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.

Unesco (s.f.). Glosario Hidrológico Internacional.

Unesco, IAH e IAEA (2007). Groundwater Resources Sustainability Indicators. In J. Vrba (Ed.), Series on Groundwater N° 14. Groundwater Indicators Working Group. IHP/2007/GW-14. Paris.

Unesco y RAPCA. Evaluación de la amenaza por inundación. Presentación ppt. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Enschede, The Netherlands. Disponible en: <http://www.itc.nl/external/unesco-rapca/start.html>

Unesco y WHO (1978). Studies and Reports in Hydrology. Water Quality Surveys.

Unesco, WHO UNEP (1999). Water Quality Assessments - A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring (2nd ed.).

Universidad de Navarra. Agentes Contaminantes del Agua. Disponible en: http://cmascript.unavarra.es/servlet/SBReadResourceServlet?rid=1200184538912_603409208_2298&partName=htmltext

Vargas, N.O. (2001). Mapa Hidrogeológico de Colombia. Escala 1:1.200.000 [Tesis para obtener el título de especialista en Recursos Hidráulicos]. Bogotá D. C. Universidad Nacional de Colombia.

Vélez, M. y Vásquez, L (2004). Métodos para determinar la recarga en acuíferos. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Avances en recursos hidráulicos, Número 11. Medellín.

Vrba, J. y Soblsek, P. (1988). Groundwater Monitoring. En Unesco y UNEP (Eds.), *Geology and the environment, an International Manual*. Checoslovaquia.

Ward, R. C. (1979). *Regulatory Water Quality Monitoring Water Resources*, 15. Waterloo Hydrogeologic, I. (2000). *Workshop of groundwater flow and transport mathematical models*. Fundación Gómez-Pardo.

Winter, T. C. Harvey, J. W. Franke, O. L. y Alley W. M. (1998). *Ground Water And Surface Water: A Single Resource*. Circular 1139. U.S. Geological Survey (USGS). Denver, Colorado, USA.

WMC. (2002). *Guía Metodológica para la Protección Integrada de Aguas Subterráneas*. Disponible en www.minambiente.gov.co//documentos/Aguas_subterr%C3%A1neas.pdf

WMO. (2008). *Guide to Hydrological Practice* (6 ed. Vol. 1 - 168). Ginebra, Suiza.

WMO/Unesco (1991). *Report on Water Resources Assessment. Progress in the Implementation of the Mar del Plata Action Plan and Strategy for the 1990s*. Ginebra, Suiza: World Meteorological Organization, y la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.

Anexo 1

Síntesis general del marco normativo relacionado con la evaluación regional del agua

NORMA	ENTIDAD QUE EXPIDE	OBJETO
Decreto 2667 de 2012	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Diciembre 21 de 2012	Por el cual se reglamenta la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones.
Decreto 1640 de 2012	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Agosto 2 de 2012	Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones.
Ley 1523 de 2012	Ministerio del interior, Ministerio de Hacienda y Crédito Público, MADS, Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Abril 24 de 2012	Por la cual se adopta la Política Nacional de Gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, y se dictan otras disposiciones
Decreto 303 de 2012	Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible. Febrero 6 de 2012	Por el cual se reglamenta parcialmente el artículo 64 del Decreto-ley 2811 de 1974 en relación con el Registro de Usuarios del Recurso Hídrico, y se dictan otras disposiciones.
Ley 1450 de 2011	Congreso de la República de Colombia. Junio 16 de 2011	Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014. Prosperidad para todos.
Resolución 075 de 2011	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Febrero 6 de 2011	Por el cual se adopta el formato de reporte sobre el estado de cumplimiento de la norma de vertimientos puntual al alcantarillado público.
Decreto 372 de 2010	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Julio 01 de 2010	Por el cual se reglamenta el Decreto-ley 2811 de 1974, la Ley 99 de 1993, la Ley 165 de 1994 y el Decreto-ley 216 de 2003, en relación con el Sistema Nacional de Áreas Protegidas, las categorías de manejo que lo conforman y se dictan otras disposiciones
Decreto 3930 de 2010	Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Octubre 25 de 2010	Por el cual se reglamenta parcialmente el título I de la Ley 9 de 1979, así como el capítulo II del Título IV - Parte III -Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974, en cuanto a usos del agua y residuos líquidos, y se dictan otras disposiciones
Decreto 4728 de 2010	Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Diciembre 23 de 2010	Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 3930 de 2010.
Decreto 1323 de 2007	Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Abril 19 de 2007	Por el cual se crea el Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH)
Decreto 1324 de 2007	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Abril 19 de 2007	Por el cual se crea el Registro de Usuarios del Recurso Hídrico y se dictan otras disposiciones

NORMA	ENTIDAD QUE EXPIDE	OBJETO
Resolución 974 de 2007	Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial.	Por la cual se establece el porcentaje de que trata el literal a) del artículo 5° del Decreto 1900 de 2006.
Ley 1151 de 2007	Congreso de Colombia. Julio 24 de 2007	Plan Nacional de Desarrollo 2006-2010. Modifica los artículos 42, 44, 46, 111 de la Ley 99 de 1993.
Decreto 2570 de 2006	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Agosto 01 de 2006	Por el cual se adiciona el Decreto 1600 de 1994 y se dictan otras disposiciones (laboratorios).
Decreto 1900 de 2006	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Junio 12 de 2006	Por el cual se reglamenta el parágrafo del artículo 43 de la Ley 99 de 1993 y se dictan otras disposiciones
Resolución 0872 de 2006	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Mayo 18 de 2006	Por la cual se establece la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas subterráneas a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones.
Resolución 0196 de 2006	Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Febrero 01 de 2006	Por la cual se adopta la guía técnica para la formulación de planes de manejo para humedales en Colombia.
Decreto 4742 de 2005	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Diciembre 30 de 2005.	Por el cual se modifica el artículo 12 del Decreto 155 de 2004 mediante el cual se reglamenta el artículo 43 de la Ley 99 de 1993 sobre tasas por utilización de aguas.
Decreto 3440 de 2004	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Octubre 21 de 2004	Por el cual se modifica el Decreto 3100 de 2003 y se adoptan otras disposiciones, reglamenta las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de vertimientos puntuales.
Resolución 866 de 2004	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Julio 22 de 2004	Por el cual se adopta el formulario de información relacionada con el cobro de las tasas por utilización de aguas y el estado de los recursos hídricos a que se refiere el Decreto 155 del 2004 y se adoptan otras disposiciones.
Resolución 865 de 2004	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Julio 22 de 2004	Por el cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones.
Resolución 0240 de 2004	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Marzo 8 de 2004	Por la cual se definen las bases para el cálculo de la depreciación y se establece la tarifa mínima de la tasa por utilización de aguas.
Resolución 157 de 2004	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Febrero 12 de 2004	Por la cual se reglamentan el uso sostenible, conservación y manejo de los humedales, y se desarrollan aspectos referidos a los mismos en aplicación de la Convención Ramsar
Decreto 155 de 2004	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Enero 22 de 2004	Por el cual se reglamenta el artículo 43 de la Ley 99 de 1993 sobre tasas por utilización de aguas y se adoptan otras disposiciones.
Decreto 3100 de 2003 modificado por Decreto 3440-04 decreto 2570-06	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Octubre 30 de 2003	Por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se toman otras determinaciones.
Decreto 1729 de 2002	Ministerio del Medio Ambiente. Agosto 06 de 2002	Por el cual se reglamenta la Parte XIII, Título 2, Capítulo III del Decreto-ley 2811 de 1974 sobre cuencas hidrográficas, parcialmente el numeral 12 del artículo 5° de la Ley 99 de 1993 y se dictan otras disposiciones.
Decreto 1604 de 2002	Ministerio de Medio Ambiente. Julio 31 de 2002	Por el cual se reglamenta el parágrafo 3 del art. 33 de la Ley 99 de 1993 Comisiones Conjuntas.

NORMA	ENTIDAD QUE EXPIDE	OBJETO
Ley 388 de 1997	Ministerio de Hacienda y Crédito Público, Ministerio de Desarrollo Económico, Ministerio del Medio Ambiente. Julio 18 de 1997	Por la cual se modifica la Ley 9 de 1989, y la Ley 2 de 1991 y se dictan otras disposiciones.
Ley 373 de 1997	Ministerio de Desarrollo Económico. Junio 6 de 1997	Por el cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro de agua
Decreto 901 de 1997	Ministerio del Medio Ambiente Abril 1 de 1997.	Por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa o indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se establecen las tarifas de estas.
Decreto 2241 de 1995	Presidencia de la República de Colombia. Diciembre 22 de 1995	Por el cual se aprueba el Acuerdo número 005, del 2 de diciembre de 1994, de la Junta Directiva del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, que adopta los Estatutos de la Entidad.
Decreto 1600 de 1994	Ministerio del Medio Ambiente. Julio 27 de 1994	Por el cual se reglamenta el Sistema Nacional Ambiental (SINA), en relación con los sistemas nacionales de investigación ambiental y de información ambiental.
Decreto 1277 de 1994	Presidencia de la República de Colombia. Junio 21 de 1994	Por el cual se organiza y establece el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).
Ley 99 de 1993	Congreso de la República. Diciembre 22 de 1993	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA), y se dictan otras disposiciones.
Decreto 2858 de 1981	Presidencia de la República de Colombia. Octubre 13 de 1981	Por el cual se reglamenta parcialmente el artículo 56 del Decreto-Ley 2811 de 1974 y se modifica el Decreto 1541 de 1978.
Decreto 1541 de 1978	Ministerio de Hacienda y Crédito Público, Ministerio de Defensa Nacional, Ministerio de Agricultura, Ministerio de Salud Pública, Ministerio de Desarrollo Económico, Ministerio de Minas y Energía, Obras Públicas, DNP. Julio 28 de 1978	Por el cual se reglamenta la Parte III del Libro II del Decreto Ley 2811 de 1974 "De las aguas no marítimas" y parcialmente la Ley 23 de 1973.
Decreto-ley 2811 de 1974	Presidencia de la República de Colombia. Diciembre 18 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.



IMPRENTA
NACIONAL
D E C O L O M B I A

Carrera 66 No. 24-09
PBX: (571) 4578000
www.imprenta.gov.co