

2014

Guía Metodológica para la **Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos**



MinAmbiente
Ministerio de Ambiente y
Desarrollo Sostenible

**PROSPERIDAD
PARA TODOS**



MinAmbiente
Ministerio de Ambiente y
Desarrollo Sostenible

**PROSPERIDAD
PARA TODOS**

Presidente de la República
Juan Manuel Santos Calderón

Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible
Gabriel Vallejo López

Viceministro de Ambiente
Pablo Véira Samper

Directora de Gestión Integral de Recurso Hídrico
Claudia Patricia Pineda González

Revisión de Textos

María Emilia Botero
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
Subdirección de Educación y Participación

Diseño y Diagramación

José Roberto Arango Romero
Grupo de Comunicaciones

Impresión

Imprenta Nacional de Colombia

Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos

Catalogación en Publicación. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Grupo de Divulgación de Conocimiento y Cultura Ambiental – Centro de documentación

Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Guía metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuíferos / Vélez Otálvaro, María Victoria, Otálvaro Hoyos, Doris Liliana, Navarro Cuervo, Luz Francly, Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico

Bogotá, D.C.: Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014.

88 p.

ISBN: 978-958-8491-83-7

1. Recurso Hídrico 2. Aguas subterráneas 3. Gestión ambiental 4. Planificación ambiental I. Tit. II. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

© Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014

Todos los derechos reservados. Se autoriza la reproducción y divulgación de material contenido en este documento para fines educativos u otros fines no comerciales sin previa autorización del titular de los derechos de autor, siempre que se cite claramente la fuente. Se prohíbe la reproducción total o parcial de este documento para fines comerciales.

Distribución gratuita

Contenido

1.	INTRODUCCIÓN	7
	ASPECTOS GENERALES	9
	Propósito y Alcance de la Guía	9
	Marco Normativo e Institucional	9
	Marco Conceptual	14
	Marco Metodológico	18
2.	FASES DEL PLAN DE MANEJO AMBIENTAL DE ACUÍFEROS	21
	FASE DE APRESTAMIENTO	21
	FASE DE DIAGNÓSTICO	28
	Modelo Hidrogeológico Conceptual	29
	Aspectos de Especial Importancia Hidrogeológica	46
	Diagnóstico Participativo	54
	Identificación de las Problemáticas sobre el Acuífero	55
	FORMULACIÓN	58
	Líneas estratégicas	59
	Fuentes de Financiación	61
	Priorización	62
	Definición de Indicadores para la Fase de Seguimiento y Evaluación	63
	FASE DE EJECUCIÓN	64
	FASE DE SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN	65
3.	ANEXOS	66
	1. FORMULARIO ÚNICO NACIONAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	76
	2. PROYECTOS ESPECÍFICOS PARA LA GESTIÓN DE ACUÍFEROS	67
	3. CASOS DE ESTUDIO	69
4.	SIGLAS Y ACRÓNIMOS, BIBLIOGRAFÍA, GLOSARIO, LEYES Y DECRETOS Y PÁGINAS WEB	81



Índice de tablas

Tabla 1.	Instrumentos de planificación de recursos hídricos	9
Tabla 2.	Ejemplo de conformación de equipo técnico para la formulación del pma de acuíferos	22
Tabla 3.	Información secundaria y sus fuentes de información	23
Tabla 4.	Clasificación de actores y sectores propuestos por diferentes entidades	27
Tabla 5.	Empleo de métodos geofísicos para las evaluaciones hidrogeológicas	32
Tabla 5.	Densidad de sondeos eléctricos de acuerdo a la escala del modelo	32
Tabla 6.	Bases de datos de libre acceso con campos climáticos precipitación	36
Tabla 7.	Constituyentes disueltos en el agua subterránea y sus efectos en la salud humana	38
Tabla 8.	Error aceptable en el balance iónico de la conductividad eléctrica	39
Tabla 9.	Error aceptable en el balance iónico según sumatoria de aniones	39
Tabla 10.	Valores de la permeabilidad	41
Tabla 11.	Variables y fuente de información para la estimación de la demanda para algunos usos	47
Tabla 12.	Variables para la estimación de la demanda futura para diferentes usos	48
Tabla 13.	Definición práctica de clases de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos	49
Tablas 14.	Fuentes potenciales de contaminación	50
Tabla 15.	Estructuración de los proyectos	58
Tabla 16.	Ejemplos de líneas estratégicas a considerar en la formulación de proyectos	59
Tabla 17.	Indicadores para aguas subterráneas valle del Cauca	64

Índice de figuras

Figura 1.	Estructura para la ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos	10
Figura 2.	Marco institucional	13
Figura 3.	Estados del agua en la tierra	14
Figura 4.	Distribución y consumo de agua en el mundo	15
Figura 5.	Fases de los planes de manejo ambiental de acuíferos	17
Figura 6.	Etapas de la fase de aprestamiento	22
Figura 7.	Propuesta de manejo y procesamiento de datos en el sistema de información geográfica	24
Figura 8.	Pasos para la identificación, clasificación y categorización de actores y sectores clave	26
Figura 9.	Etapas de la fase de diagnóstico	29
Figura 10.	Fuentes de información directa e indirecta para la fase de diagnóstico	30
Figura 11.	Tipos de porosidad	31
Figura 12.	Correlación de información geológica y geofísica	33
Figura 13.	Información contenida en el formulario único nacional de inventario de puntos de agua	34
Figura 14.	Diferentes sistemas de flujo de aguas subterráneas a escala dentro de una cuenca	35
Figura 15.	Diagrama de stiff	40
Figura 16.	Ajustes e interpretación de pruebas de bombeo y slug test	42
Figura 17.	Función básica de diferentes programas de monitoreo de aguas subterráneas	43
Figura 18.	Diagrama de flujo para la construcción modelo hidrogeológico conceptual	45
Figura 19.	Desarrollo de un inventario de fuentes potenciales de carga contaminante al subsuelo	50
Figura 20.	Perímetros de protección de pozos en un acuífero libre	52
Figura 21.	Superficie de abatimiento de un acuífero	53
Figura 22.	Interferencia entre pozos	54
Figura 23.	Ejemplo de un mapa de actores desarrollado para la formulación del plan de manejo ambiental de los acuíferos de la cuenca del río ranchería	55
Figura 24.	Matriz de interacción de la carga contaminante, la vulnerabilidad del acuífero y los perímetros de protección de pozos	56
Figura 25.	Fase de ejecución en el plan de manejo ambiental de acuíferos – pmaa	65
Figura 26.	Fase de seguimiento y evaluación en el plan de manejo ambiental de acuíferos – pmaa	65



Introducción



El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, formuló y adoptó en marzo de 2010, la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico- PNGIRH, dando cumplimiento al Plan Nacional de Desarrollo 2006 - 2010, que incorporó en el capítulo: Una Gestión Ambiental y del Riesgo que Promueva el Desarrollo Sostenible, como una de sus líneas de acción, la denominada: gestión integral del recurso hídrico. Este componente planteaba el reto de garantizar la sostenibilidad del recurso, entendiendo que su gestión se deriva del ciclo hidrológico que vincula una cadena de interrelaciones entre diferentes componentes naturales y antrópicos. En consecuencia, se requería abordar el manejo del agua como una estrategia de carácter nacional desde una perspectiva ambiental e integral que recogiera la diversidad regional y las potencialidades de la participación de actores sociales e institucionales. En este contexto, que ha determinado la necesidad de un nuevo enfoque de gestión del recurso hídrico, buscando armonizar las intenciones de desarrollo con las dinámicas del sistema natural. la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, establece directrices unificadas para el manejo del agua en el país, que además de apuntar a resolver la actual problemática del recurso hídrico, buscan promover el uso eficiente del recurso, y preservarlo como una riqueza natural para el bienestar de las generaciones presentes y futuras de Colombianos, mediante el cumplimiento de los objetivos, estrategias, metas, indicadores y líneas de acción estratégica, en un horizonte de 12 años, para cada uno de los seis objetivos definidos en materia de oferta, demanda, calidad, riesgos, fortalecimiento institucional y gobernabilidad.

El proceso de formulación de la Política, permitió además evidenciar un escaso conocimiento y baja preparación técnica y profesional en torno a las aguas subterráneas en el país, así como un bajo nivel de administración y planificación de dicho recurso hídrico, situación que resulta preocupante si se tienen en cuenta los escenarios de degradación y contaminación de los principales cuerpos de agua del país, provocados por procesos de urbanización, industria y agricultura, en razón al crecimiento de la población desde los años 60.

Con este panorama, las aguas subterráneas adquieren gran importancia como patrimonio natural; más aún si se tiene en cuenta que la mayor parte de los recursos hídricos utilizables en el planeta, se encuentran en el subsuelo y que Colombia presenta similares condiciones con un gran potencial de aguas subterráneas. El Instituto Colombiano de Geología y Minería -INGEOMINAS (hoy Servicio Geológico Colombiano –SGC) resalta en el Mapa Hidrogeológico General de Colombia (1983) y en el Atlas de Aguas Subterráneas de Colombia (2000-2004), que aproximadamente el 75% del territorio, presenta condiciones favorables para el almacenamiento de agua subterránea.

Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM, 2010, la demanda de agua en Colombia es generada principalmente para los siguientes usos: agrícola, doméstico, industrial, pecuario y servicios; el mayor porcentaje corresponde al agrícola con el 54%, le sigue con el 29% el doméstico y con el 13% el industrial, en menor escala el pecuario y el de servicios con porcentajes del 3%, y 1% respectivamente.

De otro lado, resulta relevante proteger este recurso como fuente de abastecimiento de agua potable para asentamientos humanos, teniendo en cuenta que de acuerdo con el documento en edición del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2014, aproximadamente 106 municipios dependen parcial o exclusivamente de este recurso para su abastecimiento.

Con el contexto expuesto, y en cumplimiento del Decreto 1640 de 2012, mediante el cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, fue formulado el presente documento, que recoge los insumos generados en la primera versión de la guía, elaborada por la ingeniera María Victoria Vélez O, en el año 2010, con el objeto de establecer directrices y orientaciones técnicas y metodológicas para la formulación de los planes de manejo ambiental de los sistemas acuíferos que sean priorizados por las autoridades ambientales competentes, en su jurisdicción.

La guía aborda en primera instancia los antecedentes, el marco conceptual y normativo en torno a la gestión de los recursos hídricos subterráneos, y posteriormente desarrolla cada una de las fases del plan de manejo ambiental de acuíferos, en adelante nombrado con la sigla: PMAA, resaltando el objetivo, alcance e información necesaria para adelantar cada fase, y propuestas metodológicas en los casos en que aplica.

Finalmente, como anexos se presentan la última versión del Formulario Único Nacional de Inventario de Puntos de Agua Subterránea - FUNIAS, y casos de estudio en los que se destacan algunos resultados de la implementación de planes de manejo ambiental de acuíferos en diferentes regiones del país.

Capítulo

1

Aspectos Generales

1.1. Propósito y alcance de la Guía

Esta guía, tiene como propósito principal establecer los criterios técnicos, procedimientos y metodologías, que orienten a las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible y de los grandes centros poblados, en el proceso de formulación e implementación de los planes de manejo ambiental de acuíferos (PMAA).

Se proponen orientaciones generales para el desarrollo de las diferentes fases del PMAA, en los siguientes aspectos:

- ▶ Identificación de la capacidad institucional, técnica y logística para la adecuada gestión de los recursos hídricos.
- ▶ Reconocimiento de actores claves para la formulación e implementación del PMAA.
- ▶ Construcción del modelo hidrogeológico conceptual.
- ▶ Identificación de las problemáticas asociadas con el uso, aprovechamiento, conservación y preservación del recurso hídrico.
- ▶ Construcción del escenario actual y deseado.
- ▶ Formulación de las medidas de manejo ambiental para la protección y uso sostenible del recurso.
- ▶ Definición de mecanismos de evaluación y seguimiento del PMAA.

1.2. Marco Normativo e institucional

La Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, se enmarca dentro del concepto de gestión integrada del recurso hídrico, definido por la Global Water Partnership –GWP, como: “un proceso que promueve la gestión y el aprovechamiento coordinado de los recursos hídricos, la tierra y los recursos naturales relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales”. Este concepto exige considerar el agua en todos sus estados dentro de su ciclo natural y la interdependencia de las aguas superficiales, subterráneas y marinas. Así mismo, exige considerar la interacción del recurso hídrico con los demás recursos naturales renovables interdependientes.

La Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico tiene como objetivo general, garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico, mediante la gestión y el uso eficiente y eficaz, articulados al ordenamiento, al uso del territorio y a la conservación de los ecosistemas que regulan la oferta hídrica, considerando el agua como factor de desarrollo económico y de bienestar social, implementando procesos de participación equitativa e incluyente; objetivo que se desarrolla a través de seis objetivos específicos y 19 estrategias.

Con respecto a los recursos hídricos subterráneos, la Política plantea líneas de acción estratégicas que consideran: profundizar en el conocimiento de la oferta (recursos y reservas); **priorizar acuíferos para formular e implementar los planes de manejo;** realizar inventarios y registros de usuarios del recurso hídrico a nivel de cuenca priorizada en el Plan Hídrico Nacional; implementar programas de ahorro y uso eficiente del agua; reducir los aportes de contaminación puntual y difusa; formular e implementar el programa nacional de monitoreo; incorporar la gestión de los riesgos asociados a la oferta y a la disponibilidad del recurso hídrico en los instrumentos de planificación; generar condiciones para el fortalecimiento institucional; integrar, armonizar y optimizar la normativa asociada al recurso hídrico subterráneo e; incrementar la participación de todos los sectores involucrados en su gestión integral.

Acorde con lo anterior, durante el 2012 el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en conjunto con el IDEAM, y mediante el acompañamiento de un Comité Técnico Nacional (Ministerios, Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), universidades, empresas privadas y la Asociación Colombiana de Hidrogeólogos), formuló el Programa Nacional de Aguas Subterráneas-PNASUB, en el cual se plantean las acciones y estrategias en los niveles nacional y regional para la gestión y evaluación integrada de las aguas subterráneas en Colombia. Estas

acciones y estrategias están enmarcadas en los siguientes ejes temáticos: i) conocimiento e investigación; ii) fortalecimiento institucional; iii) sistema de información en hidrogeología y; iv) manejo y aprovechamiento, las cuales serán implementadas por las entidades del Sistema Nacional Ambiental -SINA.

Para el eje temático iv. Manejo y aprovechamiento, el PNASUB establece la formulación e implementación de planes de manejo ambiental de acuíferos, a través de los cuales se abordará el conocimiento del sistema acuífero, su evaluación en cantidad y calidad y la identificación de la problemática o amenazas sobre el mismo, lo cual permitirá proyectar las medidas de manejo ambiental a través del desarrollo de procesos participativos con las comunidades y demás actores relacionados con el recurso hídrico subterráneo, con el objetivo de realizar un aprovechamiento sostenible de este valioso recurso.

Articulación de instrumentos de planificación

El Decreto 1640 de 2012, que reglamenta los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos establece que dichos instrumentos son: i) los planes estratégicos en las cinco macro-cuencas o áreas hidrográficas; ii) el programa nacional de monitoreo del recurso hídrico en las zonas hidrográficas; iii) los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas (POMCA) en sub-zonas hidrográficas o de nivel subsiguiente; iv) los planes de manejo ambiental de micro-cuencas en el nivel inferior al subsiguiente y; v) los planes de manejo ambiental de acuíferos.

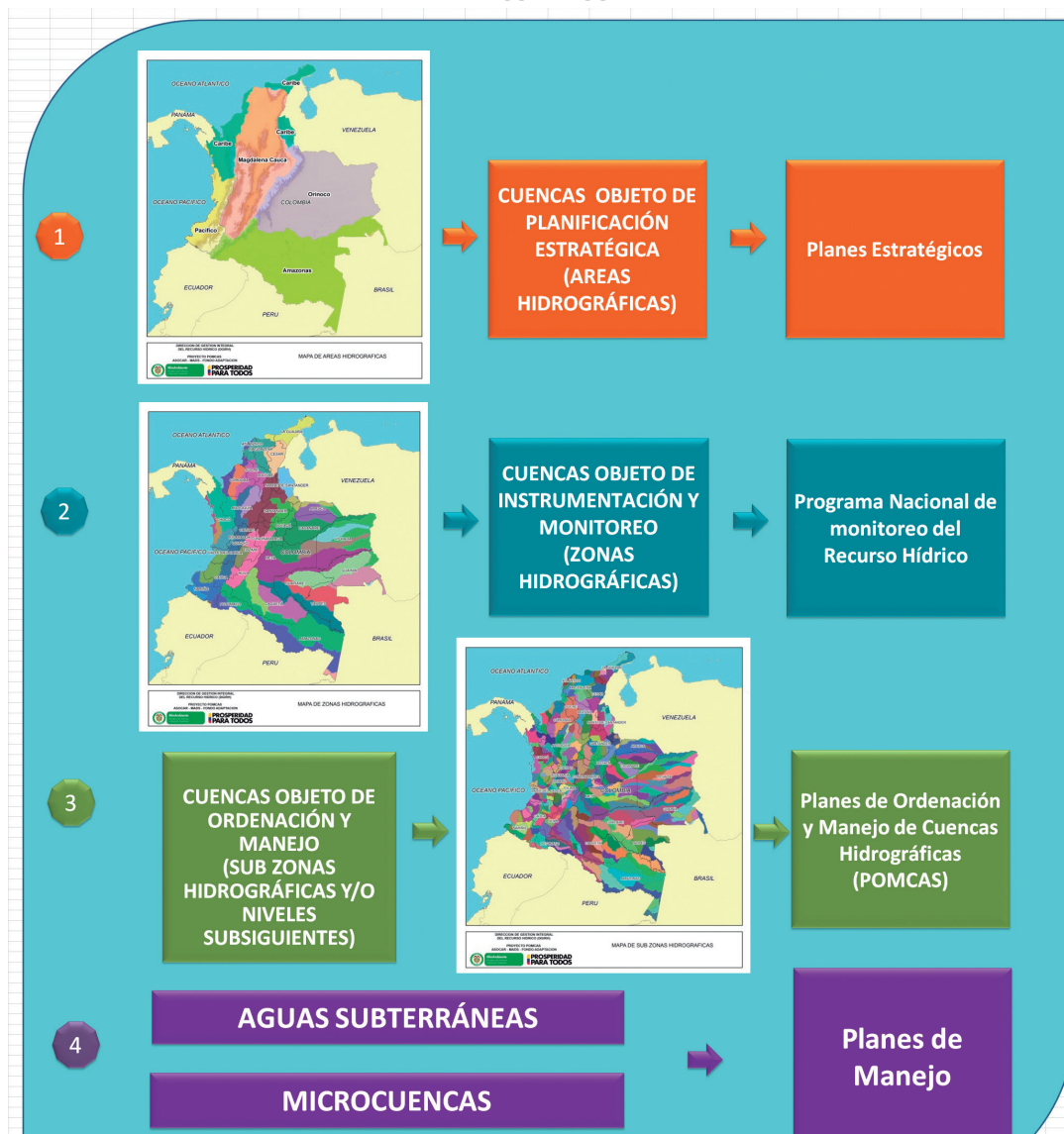
En la figura 1, se presenta la estructura de planificación de cuencas y acuíferos, y en la tabla 1 se presentan para cada uno de los instrumentos de planificación del territorio, las escalas de trabajo, el objeto principal del mismo, las instituciones o entidades participantes y las instancias de coordinación definidas en cada caso.

TABLA 1. INSTRUMENTOS DE PLANIFICACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

NIVEL	No.	ESCALA	INSTRUMENTO PLANIFICACIÓN	OBJETO	PARTICIPANTES	INSTANCIA DE COORDINACIÓN	
1	Macrocuenca	5	1:500.000	Planes estratégicos	Establecer lineamientos concertados de planificación a nivel de macrocuenca	Ministerios, Institutos de Investigación, Autoridades Ambientales Competentes, Gobernaciones, gremios y organizaciones no gubernamentales (ONG) nacionales, Cormagdalena	Consejo Ambiental Regional de la macrocuenca
2	Zona Hidrográfica	41	1:100.000	Programa Nacional de Monitoreo	Red Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico (cantidad y calidad)	MADS, institutos de Investigación, ACC.	IDEAM, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andrés" - INVEMAR en coordinación con las Autoridades Ambientales Competentes - AAC
3	Subzona o Subsiguiente	396	1:25.000	Planes de ordenación y manejo de cuencas POMCA	Ordenación y manejo del recurso hídrico y de los recursos naturales que hay en la cuenca objeto de Plan	MADS, ACC, Gobernaciones, Alcaldías, gremios y ONG regionales	Consejo de Cuenca y Comisión Conjunta

NIVEL	No.	ESCALA	INSTRUMENTO PLANIFICACIÓN	OBJETO	PARTICIPANTES	INSTANCIA DE COORDINACIÓN	
4	Acuíferos	ND	1:25.000	Plan de manejo ambiental	Medidas de manejo y protección ambiental de los acuíferos priorizados	ACC, Alcaldías, gremios, asociaciones de usuarios locales	Mesa de trabajo
	Microcuencas	ND	1:10.000	Planes de Manejo Ambiental	Medidas de manejo y protección de las microcuencas prioritarias	ACC, Alcaldías, gremios, asociaciones de usuarios locales	Mesas de trabajo

FIGURA 1. ESTRUCTURA PARA LA ORDENACIÓN Y MANEJO DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS Y ACUÍFEROS



Fuente: Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico - MAVDT, 2010 A.

Articulación Plan de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas – POMCA y– plan de manejo ambiental de acuíferos– PMAA

De conformidad con lo dispuesto en la Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico, cuando no sea prioritario el ordenamiento de la cuenca, o en tanto la autoridad ambiental competente surta el proceso de gradualidad y priorización que permita su ordenación, dicha autoridad deberá determinar cuál o cuáles son los recursos naturales renovables o los ecosistemas que soportan el mayor grado de deterioro y/o vulnerabilidad, para formular e implementar el plan de manejo a que haya lugar.

De otro lado, el artículo 28 del Decreto 1640, establece que dentro de las fases de elaboración del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica- POMCA se deberán considerar los instrumentos de planificación y/o de manejo de recursos naturales renovables existentes, como los planes de manejo de acuíferos, entre otros.

Asimismo, el artículo 35 del citado decreto, dispone que en la fase de formulación de POMCA, se deben definir e identificar los recursos naturales renovables que deben ser objeto de implementación de instrumentos de planificación y/o administración por parte de las autoridades ambientales competentes, entre los que pueden encontrarse las aguas subterráneas. De igual forma en su parágrafo cita, que en caso de que en la cuenca existan acuíferos, las medidas de manejo ambiental para la preservación y restauración, entre otros, harán parte integral del POMCA, y deberán sujetarse a lo establecido en la presente guía.

El artículo 62 del Decreto 1640 de 2012 determina que en aquellos acuíferos que no hagan parte de un plan de ordenación y manejo de cuenca hidrográfica, la autoridad ambiental competente elaborará el plan de manejo ambiental de acuíferos, previa selección y priorización del mismo.

Por lo anterior, para el caso específico de los acuíferos o sistemas acuíferos priorizados por la autoridad ambiental competente, ya sea que se encuentren dentro de una cuenca objeto de POMCA, o que sean objeto de PMAA, se deberá utilizar la presente guía, para el establecimiento de medidas de manejo ambiental para **la preservación y restauración, o para la formulación del instrumento de planificación (PMAA), respectivamente.**

Competencias institucionales

Las competencias de las entidades del orden nacional y regional, encargadas de las acciones necesarias para implementar la Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico en cuanto a las aguas subterráneas, se enuncian a continuación, con base en el documento preparado por Ardila, L., 2012.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible es el órgano rector de la gestión del medio ambiente y de los recursos naturales renovables, encargado de definir las políticas y regulaciones a las que se sujetarán la recuperación, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso y aprovechamiento de los recursos naturales renovables y el medio ambiente de la Nación, con el fin de asegurar el desarrollo sostenible (Ley 99 de 1993, artículo 2). Las funciones a cargo de este Ministerio, son las determinadas en el artículo 5 de la Ley 99 de 1993, adicionado por el artículo 2 del Decreto 3570 de 2011. Los asuntos referidos a la gestión del recurso hídrico, en particular, se asignan a la Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico (Decreto 3570 de 2011, artículo 18).

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM

El IDEAM es un establecimiento público de carácter nacional adscrito al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, encargado del levantamiento y manejo de la información científica y técnica sobre los ecosistemas que forman parte del patrimonio ambiental del país, así como de establecer las bases técnicas para clasificar y zonificar el uso del territorio nacional para los fines de la planificación y el ordenamiento del territorio (Ley 99 de 1993, artículo 17). En el artículo 4 del Decreto 1277 de 1994, se señalan entre las funciones de este instituto, la de obtener, almacenar, analizar, estudiar, procesar y divulgar la información básica sobre hidrología, hidrogeología, meteorología, geografía básica sobre aspectos biofísicos, geomorfología, suelos y cobertura vegetal para el manejo y aprovechamiento de los recursos biofísicos de la Nación.

Servicio Geológico Colombiano – SGC

El Servicio Geológico Colombiano es un instituto científico y técnico, adscrito al Ministerio de Minas y Energía, que hace parte del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación-SNCTI y tiene por objeto realizar la investigación científica básica y aplicada del potencial de recursos del subsuelo; adelantar el seguimiento y monitoreo de amenazas de origen geológico; administrar la información del subsuelo; garantizar la gestión segura de los materiales nucleares y radiactivos en el país; coordinar proyectos de investigación nuclear y el manejo y la utilización del reactor nuclear de la Nación. Corresponde a este instituto el ejercicio de las funciones contempladas en el artículo 4º del Decreto 4131 de 2011 “[...] 3. Generar e integrar conocimientos y levantar, compilar, validar, almacenar y suministrar, en forma automatizada y estandarizada, información sobre geología, recursos del subsuelo y amenazas geológicas, de conformidad con las políticas del Gobierno Nacional. [...] 8. Realizar la identificación, el inventario y la caracterización de las zonas de mayor potencial de recursos naturales del subsuelo, tales como minerales, hidrocarburos, aguas subterráneas y recursos geotérmicos, entre otros.

Corporaciones Autónomas Regionales; de Grandes Centros Urbanos; Establecimientos Públicos Distritales

Las Corporaciones Autónomas Regionales son la máxima autoridad en el área de su jurisdicción y tienen por objeto la ejecución de 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. Las autoridades ambientales urbanas del nivel territorial previstas en la ley, ejercen iguales funciones que las CAR en sus correspondientes jurisdicciones. (Artículos 30 y 66 Ley 99 de 1993; Ley 768 de 2002, artículo 13).

En lo que corresponde con la gestión integral del recurso hídrico, la Ley 1450 de 2011, artículo 215, detalla con precisión las competencias que las citadas autoridades ambientales deben ejercer en sus jurisdicciones.

Entidades Territoriales

Los departamentos, municipios y territorios indígenas, tienen a su cargo funciones de promoción y ejecución de programas y políticas ambientales, la expedición de disposiciones necesarias para el control, la preservación y la defensa del patrimonio ecológico de sus territorios, la dirección y coordinación de las actividades de control y vigilancia ambientales, y la promoción, cofinanciación y ejecución de obras y proyectos relacionados con el adecuado manejo y aprovechamiento de las cuencas hidrográficas. (Ley 99 de 1993, artículos 64, 65 y 67; Ley 715 de 2001).

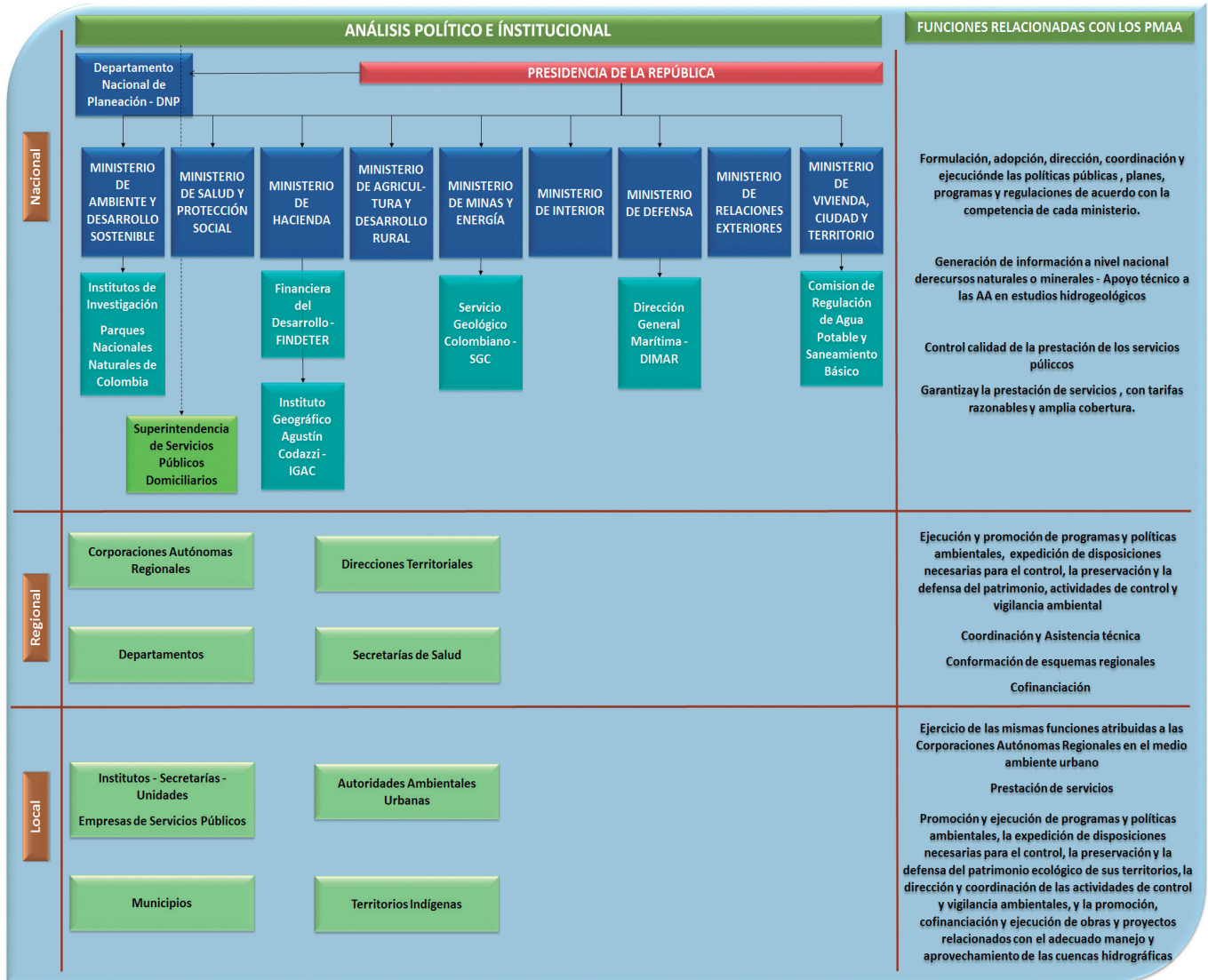
Autoridades Sanitarias y Prestadores del Servicio de Acueducto

De acuerdo con el artículo 5 del Decreto 1575 de 2007, los Ministerios de la Protección Social y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, (hoy Ministerios de Ambiente y Desarrollo Sostenible y de Vivienda, Ciudad y Territorio) en cumplimiento de las funciones a su cargo, adelantarán de manera coordinada las siguientes acciones:

- ▶ Reglamentar todos los aspectos concernientes a la definición de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua para el consumo humano.
- ▶ Diseñar los modelos conceptuales, técnicos y operativos y de protocolos que sean requeridos para el control y vigilancia para garantizar la calidad del agua para consumo humano.
- ▶ Diseñar la guía de criterios y actividades mínimas que deben contener los estudios de riesgo, programas de reducción de riesgos y los planes de contingencia.

Un contexto nacional ampliado de las entidades e instituciones de orden nacional, regional y local que tienen que ver con la gestión integral del recurso hídrico, puede observarse en la figura 2.

FIGURA 2. MARCO INSTITUCIONAL



Fuente: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Grupo de Recurso Hídrico. TALLER: "MANEJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS" Bogotá D.C., 21 de mayo de 2009.

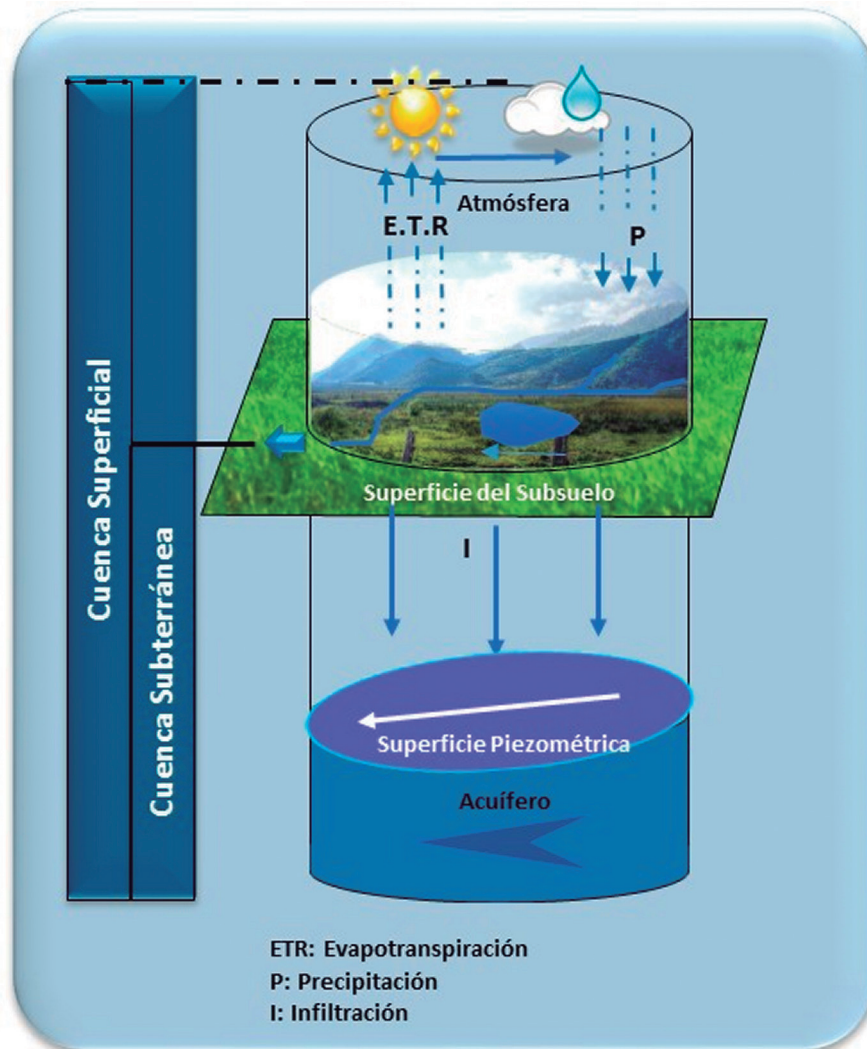
1.3. Marco conceptual

En este capítulo se presentarán de manera general, algunos aspectos relacionados con la naturaleza de las aguas subterráneas, su posición en el ciclo hidrológico, y los planes de manejo ambiental de acuíferos.

Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico se define como la secuencia de fenómenos por medio de los cuales el agua pasa de la superficie terrestre a la atmósfera en la fase de vapor y regresa a este medio, en sus fases líquida o sólida. El agua subterránea hace parte del ciclo hidrológico, y es el resultado de la infiltración profunda a través de las grietas o poros de las rocas o sedimentos, del agua proveniente de la precipitación, o de fuentes superficiales interconectadas, como ríos, lagos o lagunas. (Véase figura 3)

FIGURA 3. ESTADOS DEL AGUA EN LA TIERRA



Fuente: Modificado de <http://www.u-picardie.fr/beauchamp/cours.qge/du-7.htm>

Agua subterránea

El agua subterránea es aquella que se filtra a través del suelo, saturando las capas arenosas o rocas porosas subyacentes. La tabla de agua o nivel freático, en el caso de acuíferos libres, marca la posición bajo la cual todos los poros o grietas están saturados con agua.

La importancia global del agua subterránea puede entenderse al observar las estadísticas sobre la disponibilidad de los recursos hídricos, que señalan que el 75% del planeta está cubierto por agua, de la cual el 97.5% se encuentra en los océanos. Del 2.5% del agua fresca restante, más del 70% no está disponible para consumo humano debido a que se encuentra en forma de glaciares, nieve o hielo, un 0.3% se encuentra en lagos, ríos, humedad del suelo y, el 29.7% corresponde al agua subterránea, por lo que éstas se consideran las mayores reservas de agua dulce disponible del planeta. (Véase la figura 4)

Las aguas subterráneas son la mayor reserva de agua potable existente en las regiones habitadas por los seres humanos, representan más del 95% del total de las aguas dulces de todos los continentes e islas y son esenciales para mantener el caudal de base de muchos ríos y la humedad del suelo en las riberas y áreas bajas de las cuencas.

FIGURA 4. DISTRIBUCIÓN Y CONSUMO DE AGUA EN EL MUNDO



Fuente: Adaptada de <http://www.ison21.es/tag/agua/page/2/>

En Colombia existe un gran potencial de aguas subterráneas; INGEOMINAS resalta en el Mapa Hidrogeológico General de Colombia (1983) y en el Atlas de Aguas Subterráneas de Colombia (2000-2004), que aproximadamente el 75% del territorio, cuenta con zonas favorables para el almacenamiento de agua subterránea, especialmente en formaciones sedimentarias de edades Cuaternaria, Terciaria y Cretácica, y se calcula, a manera de pronóstico, que las zonas con mayor potencial abarcan alrededor de un 36% del área del país (415.000 Km²).

El agua subterránea en nuestro país, es aprovechada para diferentes usos, entre los que se encuentran: el riego para la agricultura en el Valle del Cauca y en las zonas bananeras de Urabá y Fundación-Ciénaga; suministro de agua potable y riego en los departamentos de La Guajira, Magdalena, Cesar, Córdoba, Bolívar, Sucre, Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Cauca, Quindío, Risaralda y Meta y; en la sabana de Bogotá para el abastecimiento de algunos municipios y en especial para el sector floricultor.

De otro lado, resulta relevante proteger este recurso como fuente de abastecimiento de agua potable para asentamientos humanos, teniendo en cuenta que de acuerdo con el documento en edición del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2014, aproximadamente 106 municipios dependen parcial o exclusivamente de este recurso para su abastecimiento.

Gestión integral del recurso hídrico

Los gestores ambientales, tanto públicos como privados, se enfrentan a una oferta de agua que disminuye frente a una demanda creciente, debido a factores como los cambios demográficos y climáticos que también incrementan la presión sobre el recurso hídrico. Éste es el fundamento del enfoque para la gestión integral del recurso hídrico, aceptado ahora internacionalmente como el camino hacia un desarrollo y gestión eficiente, equitativo y sostenible de uno de los recursos naturales cada vez más limitados, y para abordar una demanda en crecimiento y competencia.

Plan de manejo ambiental de acuíferos

Es un instrumento de planificación y administración del agua subterránea, mediante la **ejecución de proyectos y actividades de conservación, protección y uso sostenible del recurso.**

Acuíferos objeto de plan de manejo ambiental

El Decreto 1640 de 2012 en su artículo 62 establece que: “en aquellos acuíferos **que no hagan parte de un plan de ordenación y manejo de cuenca hidrográfica,** la autoridad ambiental competente elaborará el plan de manejo ambiental de acuíferos, previa selección y priorización del mismo, cuando se prevean como mínimo una de las siguientes condiciones, **en relación con oferta, demanda, calidad hídrica, riesgo y gobernabilidad:**

- ▶ **Agotamiento o contaminación** del agua subterránea de conformidad con lo establecido en el artículo 152 del Decreto Ley 2811 de 1974 reglamentado por los artículos 121 y 166 del Decreto 1541 de 1978 o la norma que los modifique o sustituya.
- ▶ Cuando el **agua subterránea sea la única y/o principal fuente** de abastecimiento para consumo humano.
- ▶ Cuando por sus **características hidrogeológicas el acuífero sea estratégico para el desarrollo** socio-económico de una región.
- ▶ **Cuando existan conflictos por el uso del agua subterránea.**
- ▶ Cuando **se requiera que el acuífero sea la fuente alterna** por desabastecimiento de agua superficial, **debido a riesgos antrópicos o naturales.**

Escalas

En la Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico se establece que los acuíferos prioritarios serán objeto de **Planes de Manejo Ambiental específicos y que los estudios se desarrollarán a escala 1:25000.**

Responsables

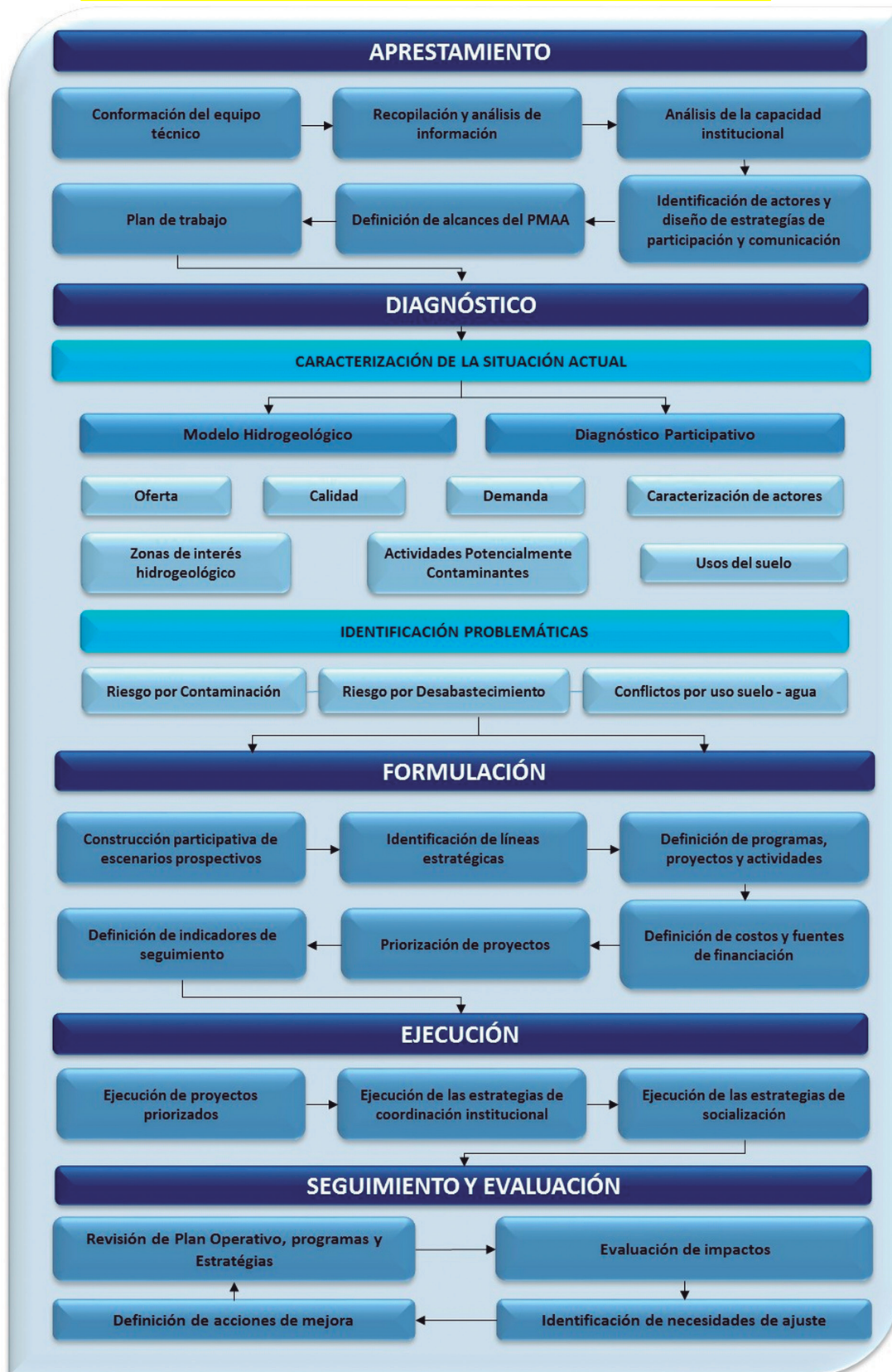
El Decreto 1640 de 2012 en su artículo 61 define que es responsabilidad de las Autoridades Ambientales competentes, formular los respectivos planes de manejo ambiental de acuíferos priorizados en su jurisdicción.

1.4. Marco metodológico

Los planes de manejo ambiental de acuíferos, se desarrollarán teniendo en cuenta las siguientes fases (véase la figura 5):

- ▶ **Aprestamiento.** Es la fase en la cual se conforma el **equipo técnico** necesario para realizar y acompañar la formulación e implementación del plan, se definen: **el plan de trabajo, la estrategia de socialización y participación y, la logística requerida.**
- ▶ **Diagnóstico.** Es la fase en la cual se **elabora o actualiza la línea base de oferta y demanda de agua subterránea,** se identifican los **conflictos** y problemáticas, se realizan el **análisis de vulnerabilidad intrínseca** de los acuíferos a la contaminación y, la identificación y **análisis de riesgos** de las fuentes potenciales de contaminación, entre otros aspectos.
- ▶ **Formulación.** En esta fase se definen las **medidas a implementar y los proyectos y actividades a ejecutar,** con el fin de solucionar la **problemática identificada en el diagnóstico,** estableciendo el **cronograma de ejecución, los costos y responsables.**
- ▶ **Ejecución.** Se desarrollan las medidas, proyectos y actividades conforme a lo dispuesto en la fase de formulación.
- ▶ **Seguimiento y evaluación.** Es la fase en la cual se realizan el **seguimiento y la evaluación del plan, conforme a las metas e indicadores planteados,** con el objeto de definir los ajustes a que haya lugar.

FIGURA 5. FASES DE LOS PLANES DE MANEJO AMBIENTAL DE ACUÍFEROS



Capítulo

2



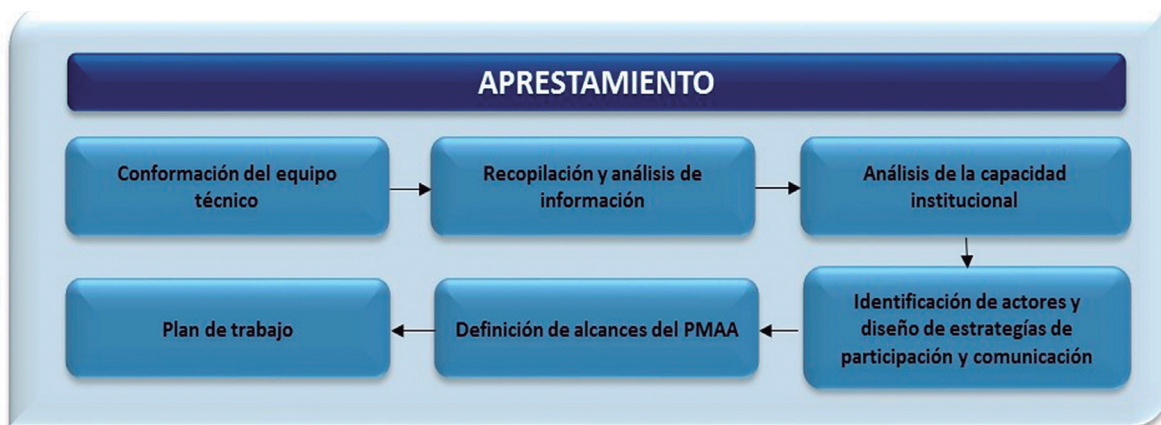
Fases del Plan de Manejo Ambiental de Acuíferos

2.1. Fase de Aprestamiento

Con esta fase se inicia el proceso de formulación del plan de manejo ambiental del acuífero. Se concibe como una fase preparatoria y de planificación en la cual se conforma el equipo técnico necesario para realizar y acompañar la formulación y ejecución del PMAA, se efectúa la recolección de información y se diseñan las estrategias de comunicación, de divulgación y de participación, se definen el cronograma de actividades, el plan operativo, y se definen algunos aspectos de logística, que permitan el normal desarrollo del proyecto.

Las actividades a desarrollar en esta fase, las cuales se presentan en la figura 6, serán descritas en los siguientes numerales.

FIGURA 6. ETAPAS DE LA FASE DE APRESTAMIENTO



Conformación del equipo técnico y definición de la logística

La Autoridad Ambiental deberá realizar una evaluación de los profesionales y técnicos que se requieren para abordar cada una de las fases del PMAA, teniendo en cuenta que éstas contemplan el análisis de aspectos técnicos, sociales y económicos, y que además involucrarán **trabajos de campo y de oficina**, y por tanto se deberá conformar un **grupo de trabajo multidisciplinario**.

En el caso de que la autoridad ambiental no cuente con los profesionales y técnicos requeridos con el conocimiento, la experiencia y la disponibilidad de tiempo para acompañar la formulación del Plan, se deberán definir los requerimientos para la contratación de dichos profesionales y técnicos. En la tabla 2, se presenta un ejemplo de conformación del equipo técnico que puede ser utilizado como guía.

TABLA 2. EJEMPLO DE CONFORMACIÓN DE EQUIPO TÉCNICO PARA LA FORMULACIÓN DEL PMA DE ACUÍFEROS

PROFESIONAL / FUNCIÓN	PERFIL
Coordinador general del proyecto	Profesional con conocimiento en aguas subterráneas y coordinación de proyectos.
Geólogo/hidrogeólogo	Profesional con experiencia en aguas subterráneas.
Hidrólogo, ingeniero civil, ingeniero ambiental	Profesional con experiencia en hidrología.
Químico, Ingeniero químico	Profesional con experiencia en evaluación de calidad de aguas.
Sociólogo, antropólogo y/o trabajador social	Profesional con experiencia en procesos de participación comunitaria y manejo de técnicas de participación.
Profesional en sistemas de información geográfica (SIG)	Profesional con experiencia en sistemas de información geográfica.
Profesionales de apoyo	Profesionales para apoyo operativo, logístico y campo.
Auxiliares	Técnicos para apoyo operativo, logístico y campo.

Fuente: Modificada MADS, Corpogujira y Universidad de Antioquia. Plan de Manejo Ambiental de Acuífero PMAA – Cuenca del Río Ranchería. 2013.

Además de definir el equipo de trabajo, se deberá establecer la logística necesaria para abordar las diferentes fases del plan, haciendo especial énfasis en los formatos y equipos para el seguimiento y monitoreo de variables de estado (caudales, niveles) y de calidad del agua subterránea. Dentro de los equipos se encuentran vehículos, sondas eléctricas para medición de niveles, medidores de parámetros de campo como pH, temperatura y conductividad eléctrica, instrumentos para aforos volumétricos de caudales, equipos de geofísica, de laboratorio, o de perforación de pozos, en caso de requerirse.

Asimismo, deberán revisarse los requerimientos para el trabajo de oficina como equipos de cómputo, los cuales deben contar con las especificaciones técnicas para soportar software para el análisis de datos hidroquímicos, geofísicos, de pruebas de bombeo, o para la construcción de modelos numéricos.

Recopilación y análisis de información secundaria

Se realizará inicialmente una compilación, revisión y evaluación de información secundaria: cartografía básica y temática, estudios, informes, diagnósticos, estadísticas evaluaciones hidrogeológicas o estudios específicos en los temas físico, social, económico y cultural realizados con anterioridad en la zona.

En la tabla 3, se relacionan los diferentes tipos de información secundaria y sus posibles fuentes de consulta.

TABLA 3. INFORMACIÓN SECUNDARIA Y SUS FUENTES DE INFORMACIÓN

TEMÁTICA	TIPO DE INFORMACIÓN	FUENTES DE CONSULTA
Cartografía y estudios	Cartografía Base	Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC Dirección General Marítima - DIMAR
	Geología/estructural	SGC Universidades INVEMAR
	Geomorfología	SGC Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM IGAC
	Suelos	IGAC Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - CORPOICA
	Usos del suelo	IGAC
	Hidrogeología regional	SGC Autoridades Ambientales Entidades territoriales Universidades
	Calidad del Agua	IDEAM INVEMAR Autoridades Ambientales
	Hidrología	IDEAM Autoridades Ambientales Instituto Colombiano de Desarrollo Rural - INCODER
Sensores Remotos	Fotografías aéreas Imágenes satelitales	IGAC Autoridades Ambientales Imágenes de satélite de libre acceso: colección de LANDSAT (Landsat MSS, TM y ETM+)
	Imágenes de radar	Mediante solicitud escrita: imágenes de radar (Radarsat 1), Con costo: Imágenes ASTER y sus 14 bandas.
Exploración geofísica	Exploración geofísica	Autoridades Ambientales
	Datos de captaciones de aguas subterráneas	Academia Compañías perforadoras de pozos / Hidrogeológicas Servicio Geológico Colombiano -SGC
Permisos y autorizaciones ambientales	Permisos de exploración de aguas subterráneas	Expedientes de autoridades ambientales
	Concesiones de aguas subterráneas	Bases de datos de permisos
	Licenciamiento ambiental	Ventanilla Integral de Trámites Ambientales en Línea - Vital
Datos y estadísticas	Concesiones	Autoridades Ambientales
	Usuarios	Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas - DANE
	Permisos	Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH)
	Expedientes	
Aspectos sociales, económicos y culturales	Población	DANE
	Comunidades étnicas	Ministerio del Interior
	Actividades productivas	Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural
	Aspectos culturales	CORPOICA
		Asociación Nacional de Empresarios de Colombia - ANDI
		Agencia Nacional Minera - ANM Agencia Nacional de Hidrocarburos - ANH Ministerio de Cultura de Colombia

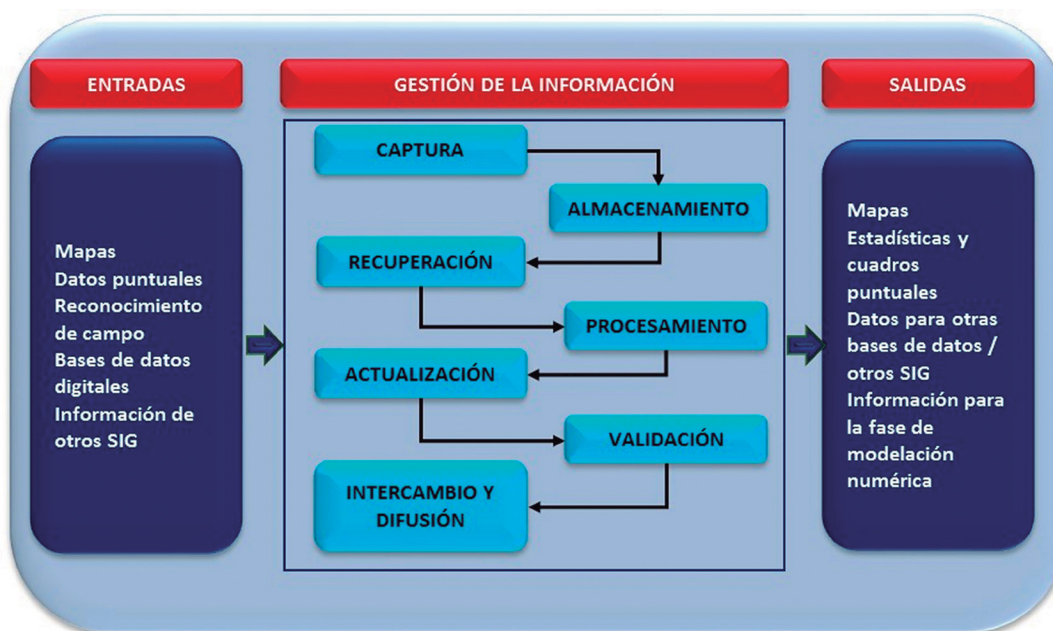
Fuente: Modificado de Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010 (d). Dirección de Licencias, Permisos y Trámites Ambientales. Metodología General para la presentación de Estudios Ambientales.

Sistema de información geográfica

La gestión de los recursos hídricos subterráneos debe basarse en información confiable, actualizada y pertinente sobre el estado de estos recursos, de los ecosistemas asociados, de los usuarios y de factores externos que pueden incidir sobre los mismos, tales como el uso de la tierra, las fuentes potenciales de contaminación y factores climáticos, entre otros aspectos.

Teniendo en cuenta que la mayoría de las autoridades ambientales cuentan con sistemas de información geográfica (SIG) en operación, se sugiere aprovechar esta infraestructura y reforzarla de acuerdo con las necesidades que se hayan identificado para la formulación del PMAA. El SIG, permite el manejo, análisis y estructuración de información alfanumérica y espacial, así como la modelación de las variables físico-bióticas y socioeconómicas que hacen parte del plan, por lo tanto, toda la información cartográfica usada y generada en las diferentes fases del PMAA, debe ser almacenada en el SIG, tomando como referencia los estándares de cartografía generados por las entidades oficiales y utilizando el sistema de coordenadas MAGNA – SIRGAS para Colombia. En la figura 7 se puede observar una propuesta de proceso de manejo de información.

FIGURA 7. PROPUESTA DE MANEJO Y PROCESAMIENTO DE DATOS EN EL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA



Fuente: Adaptado de <http://www.fao.org/docrep/003/t0446s/t0446s07.htm>

Coordinación institucional

Dentro de este proceso se deberán identificar las instituciones de carácter nacional, regional y local con las cuales se deberán coordinar acciones para la formulación e implementación del PMAA. Dentro de las instituciones nacionales se encuentran el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM y el Servicio Geológico Colombiano – SGC, quienes tienen dentro de sus funciones la definición de lineamientos técnicos y acompañamiento para abordar diferentes fases del PMAA, como se citó en competencias institucionales.

Identificación de actores y sectores claves, estrategia de participación y comunicación

Según Naciones Unidas – Comisión Económica para América Latina (CEPAL), 2002, la investigación participativa es una estrategia de investigación cualitativa que permite la interlocución entre los sujetos sociales para construir conocimiento de manera colectiva, a partir de un diálogo que concede un rol activo a la comunidad y estimula su participación en el diagnóstico y resolución de sus necesidades. Esta estrategia se ha desarrollado en las últimas décadas con más fuerza, ya que el enfoque metodológico tradicional en las ciencias sociales no privilegia los procesos participativos.

De conformidad con lo anterior, para la formulación de los PMAA, el diagnóstico social puede fundamentarse en la investigación participativa, la cual es en una herramienta de recolección de información que permite acercarse a la comprensión de la realidad, potenciar espacios de acción y transformar el contexto ambiental a favor de los ecosistemas y de las poblaciones que los habitan.

Díálogo de saberes como categoría fundamental para los procesos de planificación y educación ambiental (Tomada de MADS, Corpoguajira, Universidad de Antioquia, 2013)

Teniendo en cuenta que la investigación participativa se sustenta en principio en el dialógico entre los sujetos sociales, participantes del proceso investigativo, se considera el diálogo de saberes como una orientación metodológica del proceso de Planificación Ambiental.

Para Pablo Freire, el diálogo de saberes supone un proceso de relación horizontal, en el que todos los saberes son reconocidos y no se supone un único discurso válido. Este proceso se convierte en la forma en que los hombres se encuentran y pronuncian en el mundo un acto creador que los transforma y transforma el mundo (Freire, 1970).

El diálogo de saberes es un proceso comunicativo en el cual se ponen en interacción dos lógicas diferentes: la de conocimiento científico y la del saber cotidiano, con una clara intención de comprenderse mutuamente y que implica el reconocimiento de otro sujeto diferente con conocimientos y posiciones diversas. No riñe con una intencionalidad en la educación si se dirige a promover la libertad y la autonomía, para que cada uno tome las decisiones más apropiadas para sus condiciones y contextos particulares. En este modelo se ponen en juego las verdades, los conocimientos, sentimientos y racionalidades diferentes, procurando la búsqueda de consensos pero respetando los disensos. De esta manera se entiende como un encuentro entre seres humanos –educandos y educadores- donde ambos se construyen y fortalecen, un diálogo donde ambos se transforman (Bastidas & Colaboradores, 2009).

La investigación participativa, parte de la identificación de actores y sectores claves y su clasificación y categorización, con el propósito de definir las estrategias de participación y comunicación que serán implementadas en las fases de diagnóstico y de formulación del PMAA.

Identificación de actores y sectores

Para la identificación de actores se deben tener en cuenta entre otras, las siguientes condiciones:

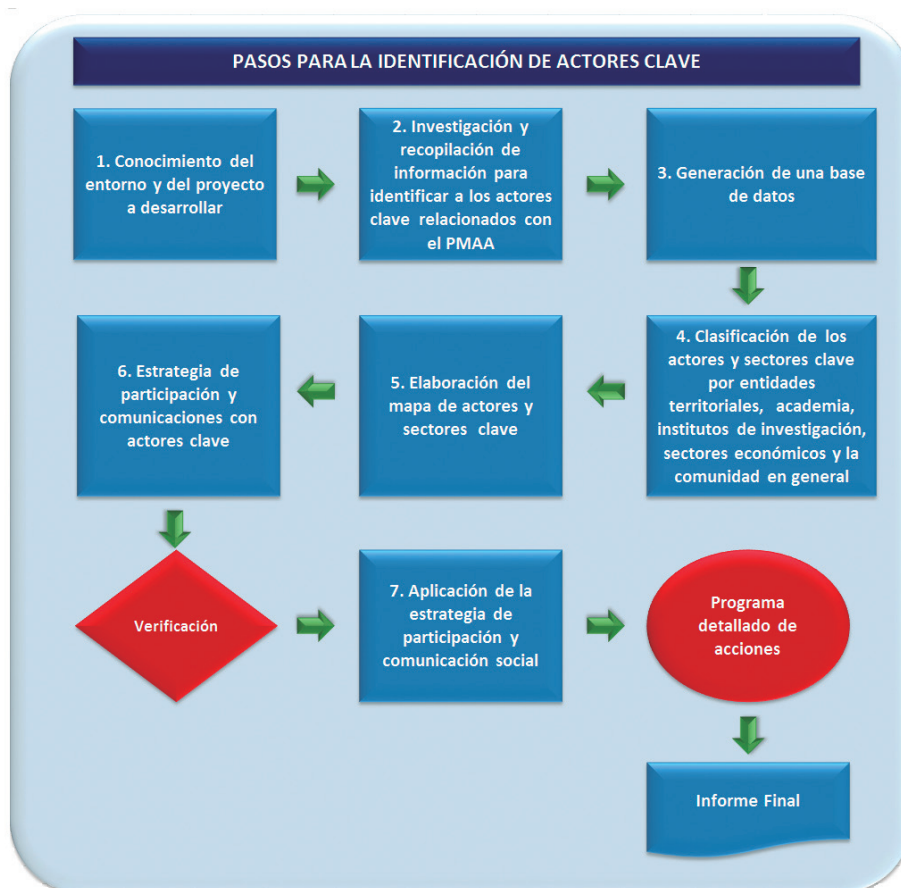
- ▶ Que formen parte de la comunidad localizada en el área de estudio y representen intereses legítimos del grupo.
- ▶ Que estén o puedan verse afectados por las condiciones actuales del recurso.
- ▶ Que puedan verse afectados por las decisiones que se tomen en el marco del PMAA.
- ▶ Que posean información, experiencia o recursos necesarios para formular e implementar el PMAA.
- ▶ Que tengan funciones y atribuciones en relación directa con los objetivos del PMAA.
- ▶ Que dispongan de capacidades, habilidades, conocimiento, infraestructura y/o recursos para proponer medidas que permitan atender los problemas y necesidades identificados.
- ▶ Que tengan capacidad de gestión y negociación con las diversas entidades y/o niveles gubernamentales para construir consensos y acuerdos.

Estos actores y sectores incluyen entidades territoriales, la academia y los institutos de investigación, los sectores económicos representados en sus organizaciones gremiales y la comunidad en general representada en organizaciones sociales, personas naturales y jurídicas, públicas y privadas que estén asentados o que tengan relación directa o indirecta con el respectivo acuífero. En la figura 8, se presentan los pasos a seguir en la identificación de actores y sectores clave.

Clasificación de actores

Después de contar con un listado completo de actores y sectores, se deben clasificar según el tipo de organización que conforman, su área de trabajo, o de acuerdo a otros aspectos que se consideren relevantes para la formulación e implementación del PMAA.

FIGURA 8. PASOS PARA LA IDENTIFICACIÓN, CLASIFICACIÓN Y CATEGORIZACIÓN DE ACTORES Y SECTORES CLAVE



Fuente: Adaptada de Guía de Identificación de Actores Clave. Comisión Nacional del Agua de México - CONAGUA, 2007.

Dentro de esta clasificación pueden estar los actores o sectores institucionales, las organizaciones de la sociedad civil y comunitaria y los sectores productivos, entre otros. En la Tabla 4, se presentan algunas clasificaciones propuestas en ejercicios de planificación ambiental realizados por la Corporación Autónoma del Valle del Cauca -CVC-, la Unión Mundial para la Naturaleza -UICN-, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia -IDEAM, 2010 y CORANTIOQUIA, Universidad de Antioquia, 2010, descritas en: MADS, CORPOGUAJIRA, UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA, 2013

TABLA 4. CLASIFICACIÓN DE ACTORES Y SECTORES PROPUESTOS POR DIFERENTES ENTIDADES

CVC Y RÍO TULUÁ	UICN	IDEAM	UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA – GRUPO GIGA
Institucional	Sector productivo	Gremial	Institucional
Comunitario	Sector industrial	Institucional	Productivo
ONG	Sector municipal	Servicios	Comercial
Privado	Sector comercio	Académicos	Comunitario
	Sector no gubernamental	Social y comunitario	
	Sector gubernamental	Etnias	
	Sector comunitario organizado	Sector financiero	
		Productores	
		Industrial y comercial	
		Control y vigilancia	

Fuente: Tomada de MADS, CORPOGUAJIRA, UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA, 2013

Caracterización preliminar de actores y sectores

La caracterización preliminar de actores permite establecer diferentes aspectos como la relación entre los diferentes actores y sectores, su poder en la toma de decisiones, su interés en la problemática y la posición que podrían adoptar respecto al PMAA, entre otros aspectos, para definir estrategias específicas que garantizan su participación y apoyo en la formulación e implementación de dicho plan.

Construcción del mapa de actores y sectores clave

A través del mapa de actores y sectores se pueden identificar de manera gráfica la influencia o posiciones de poder, la afinidad entre actores, la importancia en la formulación del PMAA y su relación con el agua subterránea, calificando estas características en alta o baja, y realizando combinaciones entre ellas.

Diseño de la Estrategia de participación

Una estrategia de participación está dirigida a asegurar que todos los actores clave: aliados, opositores y quienes aún no tienen una opinión; sepan exactamente cuáles son los propósitos del PMAA y formen parte integral de este proceso, dándoles la oportunidad de realizar aportes y generando sentido de pertenencia sobre el mismo. Esta estrategia debe estar acorde con lo que se espera del proceso de participación, y definir los papeles y responsabilidades de los actores clave, así como las herramientas y técnicas que se emplearán para que los grupos implicados en la toma de decisiones tengan una participación efectiva.

Las siguientes son algunas recomendaciones que se podrían tener en cuenta al realizar esta tarea:

- ▶ Para definir la estrategia se debe tener en cuenta el papel que cada actor clave debe desempeñar.
- ▶ Se deberán buscar los mecanismos que permitan a actores con alto interés en contribuir en la formulación e implementación del PMAA, pero con poca influencia en la toma de decisiones, sumarse al proceso y ganar poder en los espacios de participación.
- ▶ Es importante que dentro de la estrategia de participación se consideren mecanismos o acciones que permitan que actores que puedan oponerse a la formulación e implementación del PMAA, se conviertan en aliados del proceso.
- ▶ Además de diseñar estrategias para asegurar el apoyo de cada actor, es importante generar otras que permitan construir alianzas entre ellos.

Diseño de la Estrategia de Comunicación

La estrategia de comunicación debe partir de la **definición de objetivos, metas y actividades para dar a conocer las acciones adelantadas en el marco de la formulación e implementación del PMAA**, para motivar cambios de comportamiento de los actores frente al manejo y protección de los recursos hídricos subterráneos.

Como mínimo, deberá contemplar los mecanismos y medios de consulta, difusión de conocimiento e información, capacitación y medios para el diálogo e intercambio con el equipo técnico y la Autoridad Ambiental competente en todas las fases del PMAA. De igual manera, deberá considerar, cuando haya lugar, los mecanismos diferenciales para la participación de grupos étnicos (proceso de consulta previa), y tener en cuenta los planteamientos de la línea de acción estratégica: comunicaciones, del Programa Nacional de Cultura del Agua (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2013).

El Programa Nacional de Cultura del Agua, (MADS, 2013), que tiene como objeto: reconocer, fortalecer y aportar en la construcción de patrones sobre el uso, aprovechamiento, conservación y disposición del agua, mediante procesos de educación, comunicación, participación e investigación que hagan posibles movilizaciones sociales orientadas a mantener un equilibrio entre el agua y sus usuarios para garantizar la vida, se soporta en cuatro líneas de acción estratégica:

- I. Investigación social participativa y activa, para devolver el sentido y significado al líquido vital y desde allí empezar una nueva relación de la sociedad con ella;
- II. La educación para transferir a la sociedad lo aprendido y descubierto;
- III. La comunicación para hacer extensivo el conocimiento y fortalecer la cultura; y
- IV. Participación para empoderar a la sociedad de los procesos de gestión del agua, sus significados, su valor -no económico exclusivamente-, y la responsabilidad sobre la gestión integral.

Elaboración del plan de trabajo

El plan de trabajo es una herramienta que ayuda a optimizar el proceso de planificación y el seguimiento a la ejecución de los recursos y actividades programadas. Consiste en la definición de los objetivos, alcance, actividades y productos de cada una de las fases del PMAA, así como de las estrategias de recopilación y evaluación de información, de participación y comunicación. Este plan deberá contener los indicadores, medios de verificación y los resultados esperados durante cada fase.

Para su formulación se podrán tener en cuenta los siguientes cuestionamientos:

- ▶ Qué objetivo buscamos con el PMAA?
- ▶ Qué resultados esperamos? (objetivos específicos).
- ▶ Cómo vamos a lograr los resultados esperados? (estrategias).
- ▶ Cuáles actividades nos aseguran el éxito?
- ▶ Cuáles son las unidades de medida de cada una de esas actividades?
- ▶ Qué metas lograremos con cada una de las actividades?
- ▶ Cuál es el presupuesto estimado?
- ▶ Cuál es el plazo de ejecución?
- ▶ Quién es el responsable de la ejecución de cada actividad?

2.2. Fase de Diagnóstico

Es la fase de diagnóstico se realiza la caracterización del sistema acuífero y de las condiciones socioculturales de la población asociada, con el fin de elaborar o actualizar la línea base de oferta y demanda de agua subterránea, identificar los conflictos y problemáticas por uso de este recurso hídrico, analizar la vulnerabilidad intrínseca de

los acuíferos a la contaminación e identificar las fuentes potenciales de contaminación, entre otros aspectos. En la figura 9, pueden verse las etapas del diagnóstico.

FIGURA 9. ETAPAS DE LA FASE DE DIAGNÓSTICO



Modelo Hidrogeológico Conceptual

Un modelo hidrogeológico es una representación descriptiva y gráfica de un sistema acuífero que incorpora una interpretación de las condiciones geológicas e hidrogeológicas y su interrelación con sistemas asociados (ríos, lagos, ecosistemas, mar), de tal manera que se reducen el problema físico y el dominio del acuífero a una versión simplificada de la realidad.

Un modelo hidrogeológico conceptual es dinámico ya que se construye a partir de variables temporales como las climatológicas, hidrológicas e hidráulicas y por lo tanto a medida que se disponga de información nueva o se reevalúe la existente, éste deberá ser ajustado.

Para establecer el modelo hidrogeológico conceptual de un acuífero, se debe recolectar, analizar, evaluar e integrar información sobre la geología, geofísica, inventario de puntos de agua subterránea, hidrología, hidroquímica, hidráulica subterránea, entre otros. (Véase la tabla 2, de la fase de aprestamiento).

Un buen modelo hidrogeológico conceptual permite abordar más fácilmente, entre otros aspectos, la identificación de las zonas de recarga, tránsito y descarga, su relación con otros acuíferos, con las aguas superficiales y marinas, y de esta forma establecer las medidas para el manejo del acuífero, mediante programas para la protección y el aprovechamiento sostenible del agua subterránea.

Bredehoeft, J., 2005 dice: "No hay otra solución disponible a este problema del modelo conceptual diferente de: (1) recolectar tanta información como sea posible, mediante la utilización de todos los métodos aplicables, lo cual puede resultar en que esta nueva información ayude a cambiar el modelo conceptual vigente, y (2) que el analista de modelos se mantenga siempre abierto al hecho de que un modelo conceptual puede cambiar de manera total, en la medida en que se colecte más información."

En la figura 10 se presenta un esquema en el que se relacionan los métodos directos e indirectos y para la adquisición de información para las diferentes componentes del modelo hidrogeológico conceptual.

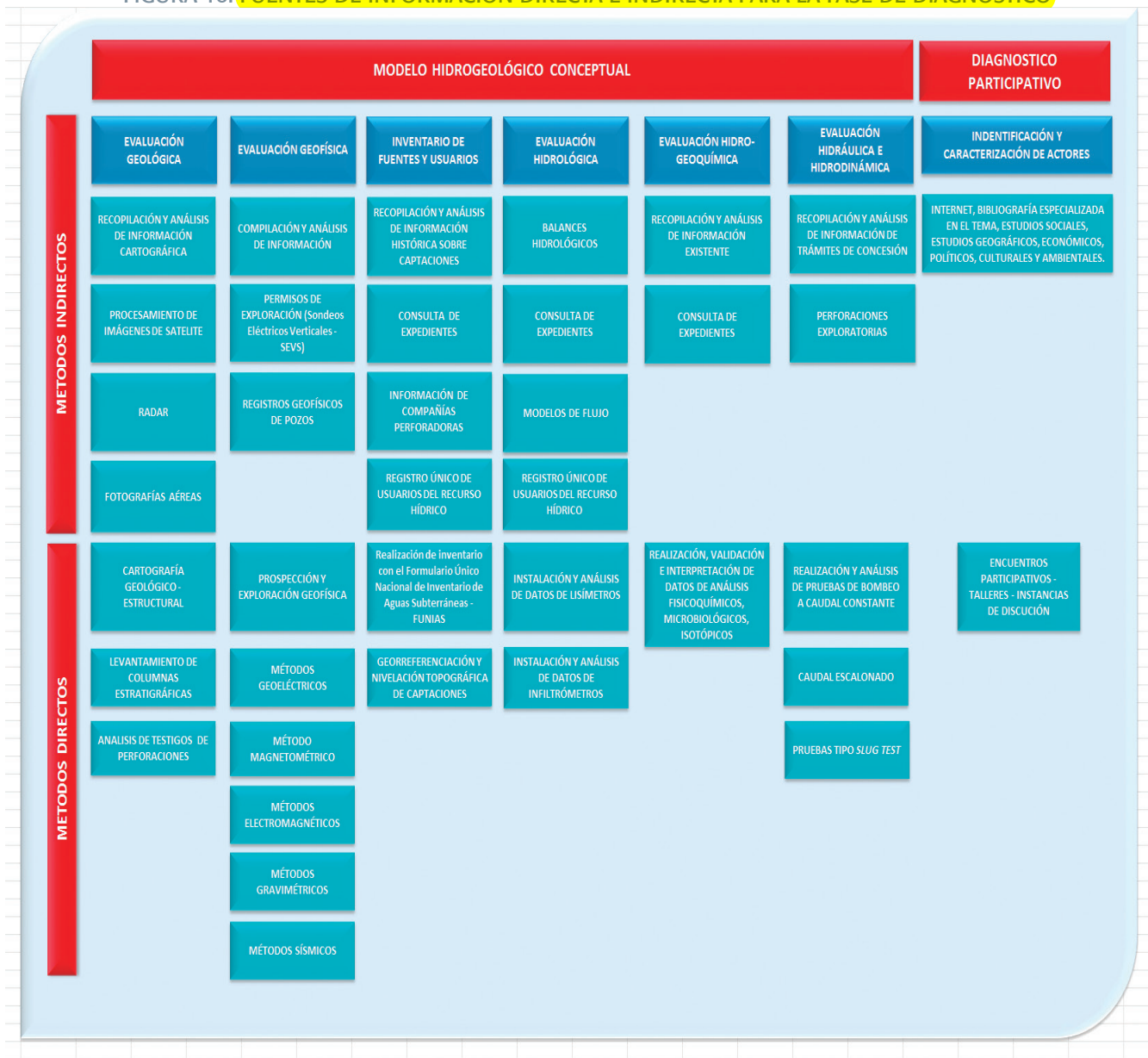
Evaluación geológica

La evaluación geológica es la base para los estudios hidrogeológicos ya que permite identificar las rocas, los sedimentos y las estructuras geológicas que favorecen la circulación y almacenamiento de las aguas subterráneas, así como la determinación de su continuidad areal y espesor.

Las aguas subterráneas ocurren generalmente en los siguientes ambientes geológicos:

- ▶ Depósitos no consolidados de gravas y arenas intercalados frecuentemente con niveles o paquetes de limos y arcillas, que son comúnmente el resultado de procesos aluviales o de depósito en las vertientes.
- ▶ Rocas sedimentarias: materiales de origen sedimentario, normalmente consolidadas y semiconsolidadas de conglomerados y areniscas, que tienen permeabilidad y porosidades primarias (intergranulares) y secundarias como consecuencia del fracturamiento (fallas, y diaclasas principalmente). Dentro de este grupo se encuentran las detríticas si se originan a partir de otras rocas, o las químicas y orgánicas, si se forman a partir de precipitación de compuestos químicos o por acumulación de restos de seres vivos.

FIGURA 10. FUENTES DE INFORMACIÓN DIRECTA E INDIRECTA PARA LA FASE DE DIAGNÓSTICO

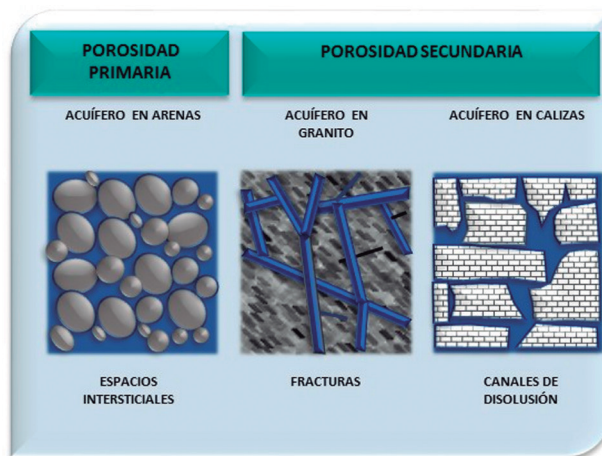


- ▶ Rocas ígneas y metamórficas: estas rocas cristalinas pueden ser bastante impermeables, sin embargo el fracturamiento originado por esfuerzos tectónicos a través de su historia geológica, puede favorecer el desarrollo de permeabilidad secundaria que permiten la circulación y almacenamiento del agua.

En esta evaluación, generalmente se parte de la revisión y análisis de la cartografía geológica existente (a escala regional); así como de la interpretación de información indirecta como fotografías aéreas, imágenes satelitales o de radar, entre otros.

El trabajo de campo a escala semi-detallada o detallada (escalas 1:25.000 o mayores), debe tener espacial énfasis en la caracterización litológica, mineralógica, estratigráfica, estructural, y en la definición de la porosidad primaria o secundaria de cada una de las unidades identificadas. (Véase figura 11).

FIGURA 11. TIPOS DE POROSIDAD



Fuente: Adaptada de Meinzer, 1923.

Para los medios fracturados, el trabajo de campo debe incluir el levantamiento detallado de datos estructurales georreferenciados, tomando además de la disposición estructural (rumbo y buzamiento) de cada discontinuidad estructural, otros parámetros necesarios como: densidad de fracturamiento; continuidad de las fracturas; apertura, relleno, entre otros.

A esta información debe darse un tratamiento estadístico, que una vez analizada con información geofísica, hidroquímica, de isótopos, entre otra, permitan valorar preliminarmente la potencialidad hidrogeológica de zonas fracturadas.

Evaluación geofísica

La geofísica consiste en la aplicación de los principios de la física al estudio de la Tierra (Overmeeren, R., 1987). Los métodos geofísicos están basados en el análisis y la variación de propiedades físicas como la resistividad, la velocidad de propagación de las ondas sísmicas, variaciones del campo magnético de la Tierra y la densidad de la roca.

A través de la aplicación de métodos geofísicos puede obtenerse información del subsuelo, la cual ayuda a identificar estructuras, fallas, estratificaciones, unidades hidrogeológicas, profundidad del basamento, condiciones de salinidad del agua, etc. Esta información al ser evaluada en conjunto con la cartografía geológica de superficie, la posición de los niveles freáticos y columnas estratigráficas de pozos, permite establecer un modelo geológico – geofísico (profundidad, espesor, continuidad lateral de unidades de interés hidrogeológico), base para la elaboración del modelo hidrogeológico conceptual.

Los estudios de exploración o prospección geofísica para aguas subterráneas han generalizado el empleo de métodos geoeléctricos como sondeos eléctricos verticales (SEV), sin embargo, de acuerdo con las características propias del medio que se requiere investigar podría ser más adecuado el empleo adicional de otros métodos o la integración de algunos de ellos. En la tabla 5, se exponen otros métodos geofísicos, los principios en los que se basan y la información que pueden obtenerse con su aplicación.

TABLA 5. EMPLEO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS PARA LAS EVALUACIONES HIDROGEOLÓGICAS

MÉTODOS	PRINCIPIOS	INFORMACIÓN QUE PUEDE OBTENERSE
Geoeléctrico	Conductividad o resistividad eléctrica	Geometría del acuífero (profundidad de formaciones impermeables y estructura del subsuelo), extensión lateral, propiedades de las formaciones (arena – arcilla), salinidad del agua, plumas de contaminación.
Sísmica de refracción	Velocidad de propagación de un esfuerzo mecánico	Depósitos secos-saturados, espesores de diferentes estratos y detección de zonas de fracturamiento.
Sísmica de reflexión	Velocidad de propagación de un esfuerzo mecánico	Zona de fallas, cartografía de estructuras de recubrimiento.
Gravimetría	Densidad	Relleno-basamento
Magnetometría	Susceptibilidad magnética	Geometría del acuífero (profundidad de formaciones impermeables y estructura del subsuelo), extensión lateral.

Fuente: CARDER – UN Bogotá, 2007. Modelo Geológico-Geofísico de un sector de Cerritos- Pereira – Risaralda.

Según INGEOMINAS en: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, IDEAM, INGEOMINAS, CORALINA y CVC, 2002, de acuerdo con la escala del modelo hidrogeológico conceptual la densidad de sondeos eléctricos verticales por Km² podría ser como se define en la tabla 5.

TABLA 5. DENSIDAD DE SONDEOS ELÉCTRICOS DE ACUERDO A LA ESCALA DEL MODELO

ESCALA	DENSIDAD POR KM ²
1:100.000	1 SEV por cada 10 km ²
1:50.000	1 SEV / 5 km ²
1:25.000	1 SEV / 2.5 km ²

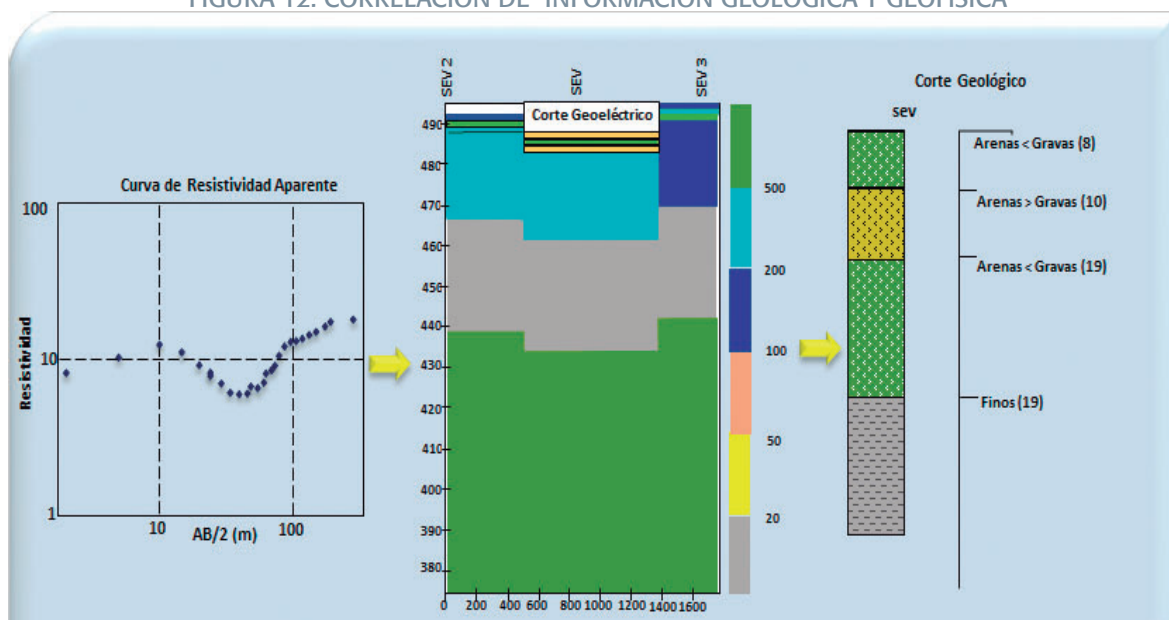
Fuente: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, IDEAM, INGEOMINAS, CORALINA y CVC, 2002

Los métodos geofísicos presentan algunas limitaciones que deben tenerse en cuenta, para su correcta aplicación:

- ▶ Debe existir un contraste importante en las propiedades físicas entre las unidades litológicas de interés.
- ▶ La profundidad de penetración y la resolución de un método específico pueden ser un factor limitante. Como regla general, a mayor profundidad de penetración, menor resolución o detalle.
- ▶ En algunos casos, pueden generar interferencia la presencia de objetos metálicos y campos eléctricos próximos (línea de transmisión eléctrica, transformadores) imposibilitando la interpretación de los datos.

En la figura 12, puede verse un ejemplo de la correlación de los sondeos eléctricos verticales con interpretación de sondeos eléctricos verticales y registros litológicos de pozos.

FIGURA 12. CORRELACIÓN DE INFORMACIÓN GEOLÓGICA Y GEOFÍSICA



FUENTE: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010 (b). Guía Metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuíferos. Informe final del contrato de consultoría individual, No. 198 de 2010 MADS - BIRF, María Victoria Vélez Otlvaro.

Inventario de puntos de agua subterránea

Un punto de agua subterránea, es un lugar u obra civil que permite el acceso al agua subterránea, incluyendo pozos, aljibes, surgencias naturales o manantiales que corresponden a descargas del acuífero; y lagos o lagunas cuando son salidas o afloramientos de acuíferos someros.

El inventario de puntos de agua subterránea es una de las actividades más importantes de los estudios hidrogeológicos, ya que a través del análisis de los datos recolectados en campo, y de la información geológica y geofísica (en caso de estar disponible), se pueden plantear de manera preliminar aspectos sobre el funcionamiento del sistema acuífero.

Este trabajo debe comenzar con la compilación y análisis de información secundaria sobre captaciones de agua subterránea, disponible en los institutos de investigación del nivel nacional o regional, entidades territoriales, instituciones académicas, o en los expedientes de trámites de concesión otorgados por la autoridad ambiental competente. Es de anotar, que entre las principales fuentes a consultar, están las compañías perforadoras de pozos que operan en la zona, las cuales generalmente conservan registros detallados de los sitios en los que han realizado trabajos de exploración y de perforación de pozos.

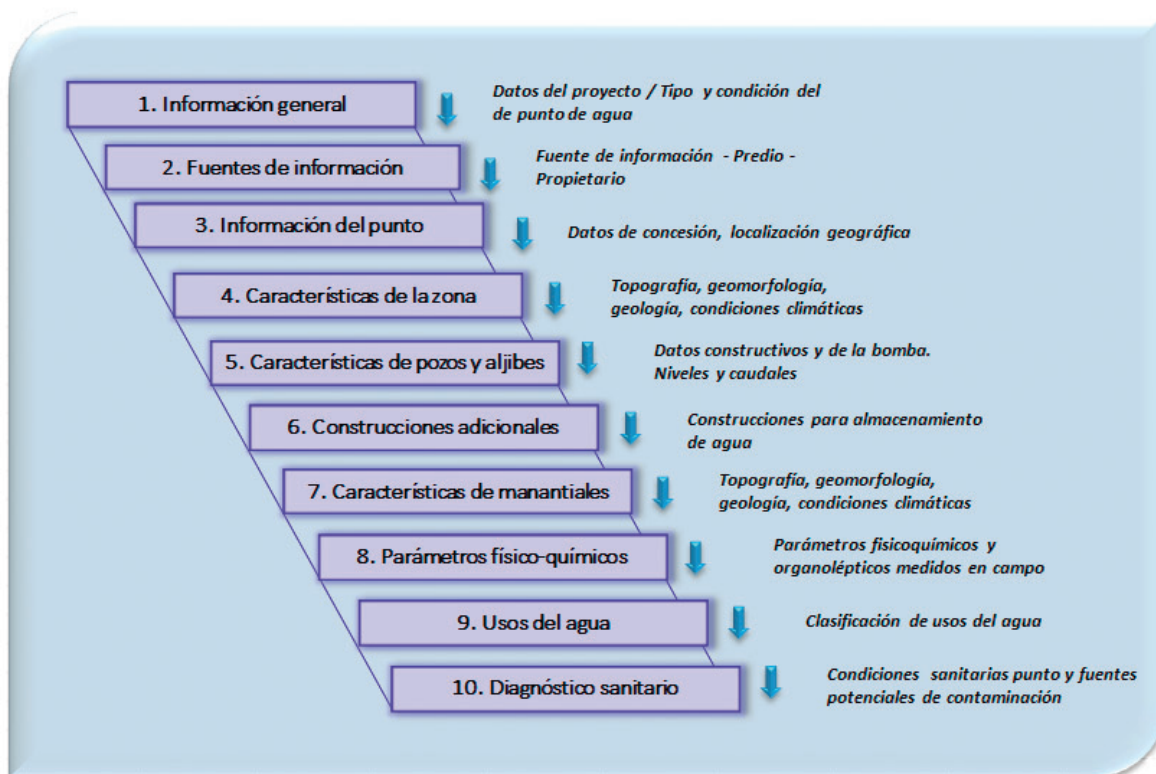
Para establecer la densidad de puntos de agua a inventariar, se deben tener en cuenta entre otras, las características del estudio hidrogeológico a realizar, la escala de trabajo de acuerdo con el tipo de estudio, bien sea de reconocimiento, regional o de detalle; del tiempo disponible para la realización del inventario; de factores económicos y; del número de captaciones existentes en la zona. De acuerdo con lo anterior, se considera un rango aceptable de 1 a 2 puntos por km² en estudios regionales (escalas 1:250.000 a 1:50.000) y de 6 a 8 puntos por km² para estudios de detalle (escalas iguales o mayores que 1:25.000); en algunos casos sin embargo, éste debe ser exhaustivo, como en estudios de contaminación. (Piñeros e Hincapié, 2009)

Los puntos de agua subterránea identificados, deben localizarse en un mapa base a escala apropiada (con información actualizada de curvas de nivel; redes hidrográficas; vías primarias, secundarias y terciarias; redes eléctricas; poliductos; caseríos; veredas; toponimia y grilla), lo cual podrá hacerse manualmente o utilizando programas que permitan visualizar la información espacial o lo que es más recomendable, haciendo uso de los sistemas de información geográfica, que permiten planear más eficientemente los recorridos para levantar la información complementaria en campo.

Para el levantamiento de la información en campo se debe utilizar el Formulario Único Nacional de Inventario de Puntos de Agua Subterránea- FUNIAS, diseñado por INGEOMINAS, IDEAM y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, con aportes de las Autoridades Ambientales competentes (Véase Anexo 1), el cual servirá a su vez de insumo para realizar el registro de usuarios del recurso hídrico (RURH), del que trata el Decreto 303 de 2012.

En el FUNIAS, se integra información de la ubicación geográfica de los puntos (coordenadas y cota), profundidad del nivel estático, caudal de producción, tiempo de bombeo, características constructivas de pozos o aljibes (profundidad, diámetro, diseño de construcción en el caso de pozos, columna litológica), parámetros físico químicos in situ (conductividad eléctrica, pH y temperatura); datos del predio y propietario, uso del agua, capacidad instalada (potencia de la bomba), entre otros. (Veáse figura 13).

FIGURA 13. INFORMACIÓN CONTENIDA EN EL FORMULARIO ÚNICO NACIONAL DE INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA



Una vez levantada la información en campo, deberá almacenarse en una base de datos, la cual debe ser compatible con el sistema de información geográfica existente en la autoridad ambiental, y permitir migrar dicha información al Sistema de Información del Recurso Hídrico – SIRH, creado mediante el Decreto 1323 de 2007. Contar con esta información almacenada y organizada en sistemas de información geográfica, facilitará el desarrollo de análisis territoriales, tales como distribución espacial de puntos de agua distribución por unidad hidrogeológica captada, por rangos de profundidad, por tipo de captación, por tipo de uso del agua, por rangos de caudales aprovechados, o mapas de parámetros físico-químicos por unidad geológica, entre otros.

El inventario de puntos de agua es el insumo fundamental para el diseño de las redes de monitoreo de calidad y de niveles del agua subterránea, los cuales a su vez permitirán construir mapas de isopiezas y redes de flujo, e identificar zonas de recarga, descarga y tránsito, indispensables para un adecuado manejo del recurso hídrico subterráneo.

Además, a través del inventario, se puede conocer información hidrogeológica como:

- ▶ Distribución en el espacio de los puntos de agua.
- ▶ Perfil litológico de las perforaciones, o ubicación geológica del manantial.
- ▶ Posición del nivel freático o piezométrico.

- ▶ Volúmenes de agua utilizada por unidad de tiempo.
- ▶ Evolución temporal de las variables (niveles, caudales y características químicas del agua).
- ▶ Distribución de la capacidad específica (caudales aprovechados por metro de abatimiento o descenso del nivel).
- ▶ Diagnóstico sanitario de las captaciones de agua, en el cual se evalúan los aspectos constructivos de la captación en superficie y la existencia de fuentes potenciales de contaminación en los alrededores de la misma.

Determinación de los sistemas de flujo subterráneo

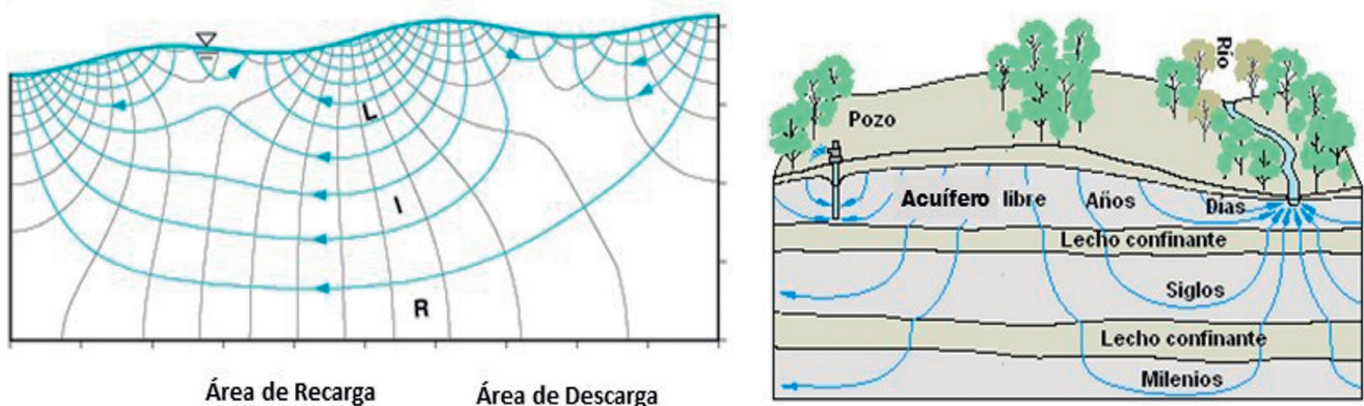
Los diferentes sistemas de flujo del agua subterránea propuestos por Tóth (1963), considerando desde el punto de vista teórico una gran cuenca superficial (véase la figura 14), tienen las características siguientes:

- ▶ Sistema de flujo local (L): son sistemas de flujo que tienen su área de recarga en un alto topográfico y el área de descarga en un bajo topográfico adyacente, es decir, localizados uno al lado del otro (en su mayoría <5 km de distancia).
- ▶ Sistema de flujo intermedio (I): es el sistema de flujo en el que sus zonas de recarga y descarga, no son adyacentes, ni tampoco ocupan las elevaciones más altas y bajas de una cuenca; pero si existe una separación entre sus zonas de recarga y descarga de uno a más altos y bajos topográficos.
- ▶ Sistema de flujo regional (R): se considera sistema de flujo regional, aquél en el que su zona de recarga ocupa la divisoria subterránea y su zona de descarga se sitúa en la parte más baja de la cuenca. Estos sistemas tienen las vías de flujo más profundas y de mayor longitud (por lo general superior a 50 km), con sistemas intermedios que operan entre estos.

Para establecer el sistema de flujo de aguas subterráneas, se puede partir de los datos del inventario, priorizando aquellos pozos o aljibes, para los que se cumplan las siguientes condiciones:

- ▶ Que se conozca el acuífero captado (ubicación de filtros, profundidad total)
- ▶ Que cuenten con nivelación topográfica a cabeza de pozo, o a nivel del terreno que permita determinar la cota del agua subterránea (cota del terreno menos profundidad del nivel freático).
- ▶ Que los pozos tengan una distribución espacial apropiada para poder correlacionar la información y construir líneas piezométricas.
- ▶ Que se cuente con condiciones técnicas en campo para la toma de niveles.
- ▶ Que sea posible obtener niveles estáticos (sin bombeo y sin interferencia de pozos cercanos en aprovechamiento).

FIGURA 14. DIFERENTES SISTEMAS DE FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS A ESCALA DENTRO DE UNA CUENCA.



L: Flujos Locales, I: Flujos Intermedios y R: Flujos regionales.

Fuente: http://larouchepub.com/spanish/other_articles/2010/NAWAPA_biospheric_development.html

Para la construcción de los mapas piezométricos se pueden utilizar técnicas de interpolación manual, o programas especializados como el SURFER, que además permite realizar análisis geoestadísticos y definir el método de interpolación de datos que se desee utilizar.

Para la validación de los sistemas de flujo determinados a partir de los datos de niveles, se utilizan análisis fisicoquímicos e isotópicos.

Análisis hidrológico

Para el análisis hidrológico debe recolectarse información de registros históricos de las variables hidroclimáticas (precipitación, temperatura, evaporación, humedad, caudal, etc.). Sin embargo, una de las mayores dificultades en Colombia para este análisis, es la escasez de registros hidrometeorológicos y sus cortas series históricas. Por lo anterior, en casos de ausencia total de información nacional puede recurrirse a las bases de datos de libre acceso, presentadas en la tabla 6, como indicadores del comportamiento del clima en una región determinada.

TABLA. 6. BASES DE DATOS DE LIBRE ACCESO CON CAMPOS CLIMÁTICOS: PRECIPITACIÓN

BASE DE DATOS	RESOLUCIÓN ESPACIAL*	FECHA DE INICIO	FECHA DE FINALIZACIÓN
Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation (CMAP)	2,5°	1979	Hasta la fecha
Global Precipitation Climatology Project (GPCP) ¹	2,5°	1979	Hasta la fecha
Climate Anomaly Monitoring System (CAMS) y OLR Precipitation Index (OPI)	2,5°	1979	Hasta la fecha
GOES Precipitation Index (GPI)	2,5°	1986	Hasta la fecha
National Centers for Environmental Prediction (NCEP) y National Center for Atmospheric Research (NCAR)	1,9°	-	-
Retrospective Analysis for South America (RASA)	1,0°	1979	Hasta la fecha
DEKAWARE	0,5°	1950	1999
North America Regional Reanalysis (NARR)	0,3°	1979	Hasta la fecha
Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)	0,25°	-	-
Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks (PERSIANN)	0,25°	-	-
Geostationary Operational Environmental Satellite - GOES	10 km	1983	-

* 1° = 111.2 km

Fuente: Hurtado, M. A., 2009

Recarga potencial por precipitación

A través del análisis de las variables hidroclimáticas podrá determinarse la recarga de los acuíferos, la cual es fundamental para establecer medidas apropiadas para el manejo y sostenibilidad del recurso hídrico subterráneo.

La recarga de acuíferos se define como el ingreso de agua en la zona saturada, donde comienza a hacer parte de las reservas subterráneas de agua (Bradbury et ál., 2000; Balek, 1988; Scanlon et ál., 2002; de Vries y Simmers, 2002). Esta entrada se da de dos maneras: la primera por un movimiento descendente del agua debido a la fuerza de gravedad y la segunda se presenta luego del movimiento horizontal del flujo debido a las diferentes condiciones hidráulicas de las capas que constituyen el perfil del suelo.

La recarga natural de un acuífero puede darse por precipitación; por aguas superficiales, es decir, a través de ríos y lagos o; por medio de transferencias desde otras unidades hidrogeológicas o acuíferos; pero también de manera artificial, producto de actividades como la irrigación, fugas de redes de acueducto o alcantarillado o por infiltraciones de embalses y depósitos (Balek, 1988; Custodio, 1997; Simmers, 1990; Lerner et ál., 1990; Samper, 1997).

En general la recarga por lluvia es la más importante, mientras que la recarga producida por ríos y lagos es importante en climas secos, y la debida a fugas en redes de acueducto y alcantarillado es de gran importancia en las zonas urbanizadas.

Expresiones empíricas para estimar la recarga potencial por precipitación

En algunos lugares no se tiene suficiente información de variables hidrológicas, de suelo y otras necesarias para estimar la recarga. En estos casos, como primera aproximación, pueden ser útiles expresiones empíricas para calcular la recarga potencial como las que se muestran a continuación, citadas en Lerner et ál., 1990:

- ▶ Cheeturvedi (Sinha y Sharma, 1988):

$$r = 1.35 (p - 14)^{0.5}$$

Donde r es la recarga (pulg./año); y p es la precipitación (pulg./año).

- ▶ Sehgal (1973)

$$r = 2.5 (p - 16)^{0.5}$$

Donde r es la recarga (pulg./año); y p es la precipitación (pulg./año).

- ▶ Turc (1954)

$$r = p \left[1 - \left(0.9 + \frac{p^2}{L^2} \right)^{-0.5} \right]$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^2$$

Donde r es la recarga (mm/año); p es la precipitación (mm/año) y T la temperatura media anual (°C).

DETERMINACIÓN DE LA RECARGA

La recarga puede determinarse por varios métodos, los cuales se clasifican en 5 grupos:

Medidas directas. La recarga se mide directamente mediante la construcción de lisímetros. Un lisímetro es un bloque de suelo dotado de dispositivos que permiten medir el flujo que drena hasta el acuífero.

Balance hídrico. Se determinan los flujos de entrada y de salida de un sistema, y la recarga al acuífero la constituye el residuo de la ecuación de balance; hacen parte de este grupo los balances de humedad del suelo, de agua en canales, el método de fluctuaciones del nivel freático, y el que iguala la descarga a la recarga. Para hallar la recarga por estos métodos son necesarios registros históricos de variables como la precipitación, los caudales y la evapotranspiración. El manejo y procesamiento de toda esta información hidrológica implica una serie de procedimientos, que en general, consisten en análisis estadísticos de los datos para la identificación de valores anómalos, patrones o tendencias en la media y/o varianza de las series, entre otros.

Trazadores. Su principal uso es determinar fuentes de recarga y zonas de descarga aunque se utilizan para cuantificar la recarga a través de un balance de masa del trazador.

Aproximaciones de Darcy. Se encuentran valores de cabezas hidráulicas a partir de las ecuaciones de flujo de Richards y Boussinesq y luego se determina la velocidad de filtración. Si se asumen condiciones estables, la recarga se determina directamente de la ecuación de Darcy.

Caracterización hidrogeoquímica y determinación de la calidad del agua

Las características químicas del agua subterránea están condicionadas o controladas por la litología y mineralogía de los sedimentos y rocas por las que circula. Esta interacción imprime una “marca” o “huella” al agua subterránea, que permite validar un sistema preliminar de flujo y determinar zonas de recarga, a través de análisis de iones principales y trazas, y de los llamados trazadores físicos como la temperatura, el pH y la conductividad. Esta validación puede ser complementada luego con análisis isotópicos.

Según Foster, S. et al. 2002 -2005, nueve constituyentes químicos conforman el 99% del contenido soluto en las aguas subterráneas naturales (Na, Ca, Mg, K, HCO₃ Cl, SO₄, NO₃ y Si). (Véase tabla 7). La proporción de cada uno de estos constituyentes, así como la de elementos traza asociados, reflejan la trayectoria del flujo del agua subterránea y su evolución hidrogeoquímica.

TABLA 7. CONSTITUYENTES DISUELTOS EN EL AGUA SUBTERRÁNEA Y SUS EFECTOS EN LA SALUD HUMANA

ELEMENTOS PRINCIPALES (mg/l)			ELEMENTOS TRAZA (ug/l)			
Mg*	Na*	HCO ₃ *	V*	Li*	P*	Sr*
K*	Ca*		Se*	Ba*	B	F*
Si*	SO ₄ *		As	Cu*	Br	
	Cl*		Cd	Mn*	Fe*	
	NO ₃ *		Co*	U	Zn*	
Probablemente esencial para la salud humana. As: tóxico o indeseado en cantidades excesivas (probablemente también esencial en donde se indique) B: Otros elementos			Ni	I*		
			Cr*			
			Pb			
			Al			

Al: Aluminio

As: Arsénico

B: Boro

B: Bario

Br: Bromo

Ca: Calcio

Cd: Cadmio

Cl: Cloro

Co: Cobalto

Cr: Cromo

Li: Litio

Mg: Magnesio

Mn: Manganeseo

Na: Sodio

Ni: Níquel

NO₃: Nitrato

P: Fósforo

Pb: Plomo

Sc: Selenio

Si: Sílice

Fuente: modificada de Banco Mundial, 2002-2006 (c) serie de notas informativas. Nota 14.

Los muestreos de calidad deben realizarse de conformidad con los protocolos para el monitoreo y seguimiento establecidos por el IDEAM, 2004, o las actualizaciones que se realicen a dichos protocolos. Asimismo, se debe tener en cuenta que los laboratorios que realicen los análisis deben estar acreditados de acuerdo con las disposiciones legales vigentes en la materia: parágrafo 2, artículo 5 del Decreto 1600 de 1994 y Decreto 2570 del 2006 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. El listado de los laboratorios acreditados se encuentra actualizado en la página web del IDEAM.

Previamente a la clasificación y determinación de la calidad del agua subterránea, se deben verificar la consistencia y confiabilidad de los análisis de laboratorio, a través del balance iónico (electroneutralidad) y la verificación por medio de algunas relaciones interparamétricas.

El balance iónico, mide la diferencia entre el total de aniones y cationes expresados en mili- equivalentes por litro (meq/L), determinados analíticamente. El error del balance iónico, se define según la siguiente ecuación:

$$Error(\%) = \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}} * 100$$

Los rangos de error aceptables dependen del valor de conductividad eléctrica (Custodio E. y Llamas, M.R., 1976), o de la sumatoria de aniones (Crites y Tchobanoglous, 2000 en: Universidad Nacional De Colombia. Sede Medellín, 2009), como se muestra en las tablas 8 y 9, respectivamente.

TABLA 8. ERROR ACEPTABLE EN EL BALANCE IÓNICO DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (µs/cm)	50	200	500	2000	>2000
Error Aceptable (%)	± 30	± 100	± 8	± 4	± 4

Fuente: Universidad Nacional De Colombia. Sede Medellín, 2009.

TABLA 9. ERROR ACEPTABLE EN EL BALANCE IÓNICO SEGÚN SUMATORIA DE ANIONES

ΣANIONES (meq/L)	ERROR ACEPTABLE (%)
0 - 3	± 0.2
3 - 10	± 2
10 - 800	± 5

Fuente: Universidad Nacional De Colombia. Sede Medellín, 2009.

Las relaciones interparamétricas más comunes para complementar el criterio de verificación de análisis químicos son las siguientes:

La relación $\frac{k}{(Na+k)}$ debe ser menor al 20 %

La relación $\frac{Mg}{(Ca+Mg)}$ debe ser menor al 40 %

La relación $\frac{Ca}{(Ca+SO4)}$ debe ser mayor al 50 %

La relación $\frac{Na}{(Na+Cl)}$ debe ser mayor al 50 %

La relación entre los sólidos disueltos totales (SDT) y la conductividad eléctrica debe ser:

$$0.55 < \frac{SDT \text{ medido}}{conductividad \text{ eléctrica}} < 0.75$$

La relación entre la conductividad eléctrica y el total de cationes debe ser:

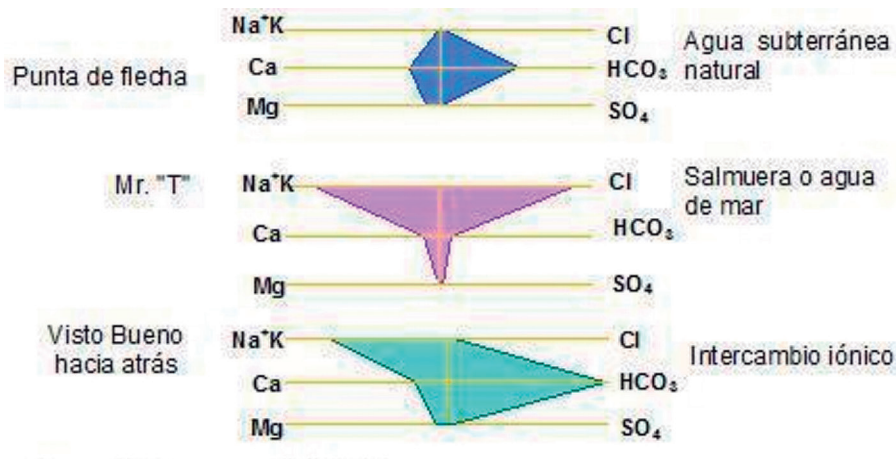
$$90 < \frac{Conductividad \text{ eléctrica}}{\Sigma cationes \text{ meq/l}} < 110$$

En caso de no contar con programas computacionales especializados para interpretación de datos hidroquímicos, se pueden utilizar programas de libre acceso como el easy-quim, desarrollado por el Departamento de Ingeniería del Terreno de la Universidad Politécnica de Cataluña en 2001, el cual permite calcular el balance iónico y algunas relaciones interparamétricas, y realizar gráficas para facilitar la interpretación de datos. Debe anotarse que en este programa el porcentaje de error se calcula usando un factor multiplicador de 200. (Disponible en: http://www.h2ogeo.upc.es/software/easy_quim/index.htm).

Los datos hidroquímicos pueden ser representados a través de gráficas que muestran sintéticamente las características químicas principales del agua, facilitando su clasificación. Dentro de estos se encuentran los diagramas de Piper, de Schoeller, columnar de Collins y de Stiff, entre otros.

Los diagramas de Stiff, son útiles para hacer comparaciones rápidas entre agua proveniente de varias fuentes. En ellos se representan las concentraciones (miliequivalentes por litro) de aniones (hacia la derecha) y cationes (hacia la izquierda) en semirrectas paralelas, uniendo los extremos y generando un polígono. (Véase figura 15).

FIGURA 15. DIAGRAMA DE STIFF



Fuente: modificado de <http://www.aguaysig.com/2011/01/los-diagramas-mas-usados-para-la.html>

A partir de los datos obtenidos, se pueden realizar mapas de isocontenidos, que están formados por isolíneas o líneas de igual concentración, en el caso de los iones. También se pueden generar mapas de otros parámetros: temperatura, conductividad, relaciones iónicas, entre otros.

Calidad del agua

Los análisis fisicoquímicos y bacteriológicos permiten determinar la calidad del agua subterránea para diferentes usos, definir medidas de manejo en aquellas captaciones en que los límites estén por encima de las normas establecidas y, determinar zonas en las que existen procesos de contaminación.

Debe tenerse en cuenta que para los diferentes usos del agua establecidos en el Decreto 3930 de 2010, se reglamentarán los criterios de calidad correspondientes, estando transitoriamente vigentes los establecidos en el Decreto 1594 de 1984.

Isótopos ambientales

Un isótopo es un elemento que tiene el mismo número atómico, pero diferente masa. Aunque algunos de los elementos que se presentan en los acuíferos pueden tener varios isótopos, sólo algunos de ellos son de importancia práctica para hidrogeología.

El término isótopo ambiental hace referencia a los presentes en la naturaleza, resultado de procesos naturales o por las actividades antrópicas, y que se encuentran en gran abundancia, entre ellos encontramos: H, C, N, O y S. Los más utilizados en estudios hidrogeológicos son los isótopos del H: H₂ (Deuterio); H₃ (Tritio); del oxígeno: O₁₈, C: C₁₃ y C₁₄. En hidrogeología los isótopos permiten verificar las hipótesis del modelo hidrogeológico en los siguientes temas:

- ▶ Áreas de recarga.
- ▶ Patrones de circulación de aguas subterráneas.
- ▶ Tiempo de residencia del agua subterránea o edad del agua.
- ▶ Verificación de balances hídricos.
- ▶ Identificación de posibles fuentes de contaminantes en acuíferos contaminados.

Hidráulica de pozos

Para establecer el comportamiento actual y futuro de un acuífero es indispensable la estimación de sus parámetros hidráulicos como: conductividad hidráulica (K [L/T]), transmisividad (T [L²/T]) y coeficiente de almacenamiento (S), los cuales pueden obtenerse por medio de pruebas de bombeo. Las pruebas de bombeo, se utilizan también para estimación de recursos, para inferir el comportamiento de un acuífero ante regímenes de extracción de agua y, para determinar los caudales de explotación, entre otros.

La permeabilidad (K) es la capacidad de un medio poroso que permite el movimiento del agua, usualmente las unidades más permeables son los depósitos sedimentarios fluviales, aluviales, coluviales, lacustres y lagunares. La permeabilidad depende, básicamente, de la cantidad de finos, del grado de compactación y de cementación de los depósitos o rocas. En la tabla 10, se presentan algunos valores de permeabilidad en diferentes rocas.

TABLA 10. VALORES DE PERMEABILIDAD

ROCAS	K (m/día)	GRADO DE PERMEABILIDAD	TIPO DE FORMACIÓN
Grava limpia	1000	Buena – muy buena	Permeable
Arena gruesa limpia	10 - 1000	Buena – muy buena	Permeable
Mezcla de arena	5 - 10	Mala	Semi permeable
Arena fina	1 - 5	Mala	Semi permeable
Arena limosa	0.1 - 2	Mala	Semi permeable
Limo	0.001 - 0.5	Mala	Semi permeable
Arcilla	< 0.001	Nula	Impermeable

Fuente: Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín, 2009.

La transmisividad (T) se define como el volumen de agua por unidad de tiempo (o caudal) que pasa a través de una sección vertical de ancho unitario y de altura b , siendo b la altura de la zona saturada.

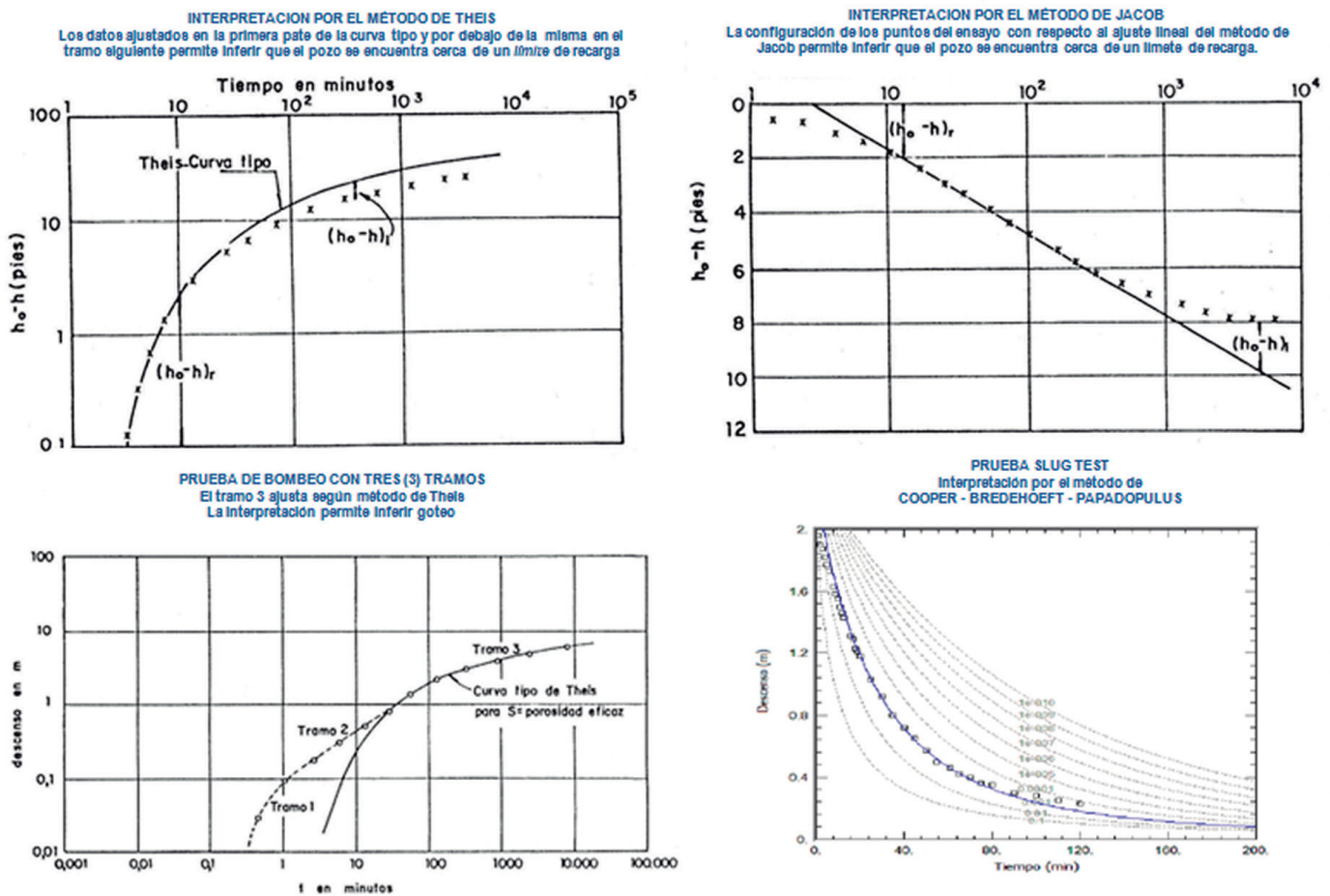
El coeficiente de almacenamiento (S) se define como el volumen de agua que es liberado por un prisma del acuífero de sección unitaria y de altura igual a la parte saturada del mismo cuando se produce un cambio unitario del nivel piezométrico.

Otro parámetro que puede ser obtenido en las pruebas de bombeo es la capacidad específica de una captación (q), la cual se define como la relación entre el caudal bombeado (Q) y el abatimiento o descenso del nivel en el pozo (s). El objeto fundamental de este valor es establecer la productividad relativa de una captación, y en la medida en que se disponga de información representativa, clasificar las unidades hidrogeológicas.

La mayoría de las pruebas de bombeo se hacen para régimen transitorio (los abatimientos o descensos del nivel varían con el tiempo) y emplean métodos como el de Theis, Jacob o Hantush para su interpretación. Hay casos donde deben emplearse otro tipo de pruebas, como los llamados Slug test para captaciones de gran diámetro, como los aljibes. En la figura 16, se muestran formas típicas de los datos obtenidos de pruebas de bombeo.

Las pruebas de bombeo a caudal variable o escalonado, se utilizan para determinar la curva característica de un pozo, la cual permite fijar los criterios de mantenimiento, determinar costos de extracción de un metro cúbico de agua y seleccionar los equipos de bombeo adecuados.

FIGURA 16. AJUSTES E INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS DE BOMBEO Y SLUG TEST



Fuente: VÉLEZ M. V., 1999. *Hidráulica de Aguas Subterráneas*, 2ª edición. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 1999.

Las principales consideraciones a tener en cuenta al momento de realizar una prueba de bombeo se relacionan con el objetivo perseguido, el ambiente geológico y la duración de la prueba, que a su vez depende de las dimensiones del pozo, la capacidad de la bomba y las características de flujo del acuífero.

Para la correcta realización de una prueba de bombeo, es indispensable contar con equipos adecuados para tener un control constante sobre el caudal bombeado y las variaciones de los niveles del agua subterránea con el tiempo. Para esto pueden usarse técnicas de medición manual (aforo volumétrico para caudales, sondas eléctricas para niveles) o con instrumentación (caudalímetros, manómetros para caudales, sistemas de monitoreo permanente niveles como datalogger). Asimismo, es indispensable contar con formatos adecuados para almacenar los datos y las observaciones que puedan ser relevantes al momento de la interpretación de los resultados obtenidos con la prueba.

Redes de monitoreo

En términos generales, el monitoreo ha sido definido como la observación continua del medio ambiente, con métodos estandarizados (UNESCO, WHO, 1978). De manera particular, el monitoreo del agua subterránea puede ser entendido como un programa de continua supervisión diseñado científicamente, que incluye observaciones, mediciones, muestreo y análisis estandarizado metodológica y técnicamente de variables físicas, químicas y biológicas seleccionadas (Vargas, 2004).

Para el diseño de la red de monitoreo se deben considerar los objetivos, los criterios de representatividad espacial, la hidrogeología de la zona, las líneas de flujo de la zona de estudio (zonas de recarga, tránsito y descarga), las características de los pozos de monitoreo y/o piezómetros y la ubicación de los mismos con respecto a las fuentes potenciales de contaminación.

Los principales objetivos de una estrategia de monitoreo de aguas subterráneas son (VRBA, J. 2000):

- ▶ Soportar la estrategia de protección de aguas subterráneas en los niveles locales, regionales y nacionales con el objetivo de preservar sus propiedades naturales especialmente para propósitos de abastecimiento de agua potable.
- ▶ Proveer datos representativos sobre el estado natural y las tendencias del acuífero con fines de planeación, manejo y toma de decisiones sobre la protección y conservación de las aguas subterráneas.
- ▶ Disponer de datos precisos y confiables para ayudar a identificar la existencia de fuentes puntuales y difusas de contaminación.
- ▶ Producir datos para estudiar los cambios en el espacio y en el tiempo en la calidad del agua de los acuíferos debido a procesos naturales y antrópicos.

Según el Banco Mundial, 2002-2006 (b), (Serie informativa N. 9), de acuerdo con la función básica u objetivo propuesto, se contemplan diferentes niveles dentro de los programas de monitoreo de aguas subterráneas, los cuales se citan a continuación:

- ▶ El Primario o de Referencia, con el cual se pretende conocer el estado general del recurso e identificar las variaciones en el tiempo, atribuibles a factores propios del acuífero o externos.
- ▶ El Secundario o de Protección, que se implementa cuando se conocen de antemano condiciones particulares que puedan amenazar el recurso en términos de calidad o de cantidad.
- ▶ El Terciario o de Contención, de la contaminación o de los impactos negativos causados por agentes externos.

En la figura 17 se presenta la función básica y los requerimientos de ubicación de puntos de aguas subterránea, de acuerdo con el nivel de programa de monitoreo.

FIGURA 17. FUNCIÓN BÁSICA DE DIFERENTES PROGRAMAS DE MONITOREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

SISTEMA	FUNCIÓN BÁSICA	UBICACIÓN DE LOS POZOS
Primario (Monitoreo de Referencia)	Evaluación del comportamiento general del agua subterránea: <ul style="list-style-type: none"> • Las tendencias resultantes de cambios en el uso del suelo y la variación climática. • Los procesos tales como la recarga, flujo y contaminación difusa. 	En zonas con hidrogeología y uso del suelo uniformes.
Secundaria (Monitoreo de Protección)	Protección contra impactos potenciales en: <ul style="list-style-type: none"> • Un recurso de agua subterránea que sea estratégico. • Los campos de pozos o manantiales para abastecimiento público de agua. 	Alrededor de las zonas, instalaciones o sitios peculiares que requieran protección.
Terciario (Contención de la Contaminación)	Alerta oportuna del impacto en el agua subterránea por: <ul style="list-style-type: none"> • El uso agrícola intensivo del suelo • Las industrias • Los rellenos sanitarios • Las zonas de recuperación de suelos • Las minas y canteras 	Inmediatamente gradiente arriba o gradiente debajo de la situación que represente el peligro.

Fuente: Tomada de Banco Mundial, 2002-2006 b. Serie Informativa No. 9- Requerimientos del Monitoreo de Aguas Subterráneas.

ALGUNAS HERRAMIENTAS PARA EL MONITOREO DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN COLOMBIA

- ▶ El Decreto 1323 de 2007, crea el Sistema de Información del Recurso Hídrico- SIRH, el cual se define como el conjunto 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, y hace parte del Sistema de Información Ambiental de Colombia -SIAC. En este contexto, establece para las diferentes entidades que conforman el SINA, en el marco de sus competencias, las funciones para la estructuración y puesta en marcha del SIRH.
- ▶ El Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico, que de acuerdo con el Decreto 1640 de 2012, se adelantará a nivel de las Zonas Hidrográficas definidas por el IDEAM, las cuales serán el espacio para monitorear el estado del recurso hídrico y el impacto que sobre éste tienen las acciones desarrolladas en el marco de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Este programa será implementado por el IDEAM y el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andreis" -INVEMAR en coordinación con las autoridades ambientales competentes, de conformidad con las funciones establecidas en el Decreto 1323 de 2007.
- ▶ La PNGIRH, plantean estrategias de monitoreo, seguimiento y evaluación del recurso hídrico, como medio para realizar una gestión eficiente del agua y medir el logro de los objetivos y metas de dicha Política.
- ▶ Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas. IDEAM, 2004. Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua y anexos. IDEAM. 2007.
- ▶ Primera generación de indicadores de la línea base ambiental de la información ambiental de Colombia. 2002. SIAC.
- ▶ Guías de prácticas Hidrometeorológicas. OMM N° 168. Volumen 1 – 1984. Versiones actualizadas están disponible en: http://www.whycos.org/hwrrp/guide/index_es.php
- ▶ Norma técnica Colombiana GTC30. Gestión ambiental. Suelos. Guía para el monitoreo de aguas subterráneas. ICONTEC. 1996b.
- ▶ Norma técnica colombiana NTC 3948. 1996. Gestión Ambiental. Suelo. Especificaciones técnicas para la construcción de un pozo de monitoreo para aguas subterráneas, ICONTEC, 1996a.

Dadas las características hidroclimatológicas generales en Colombia se recomienda realizar como mínimo dos muestreos anuales de calidad de agua y cuatro mediciones de niveles con el fin de establecer los cambios o alteraciones en términos de calidad y cantidad en épocas secas y lluviosas.

Construcción del modelo hidrogeológico conceptual

El modelo hidrogeológico conceptual, resulta del análisis e integración de la información geológica, geomorfológica, geofísica, hidrológica, hidroquímica e hidráulica de aguas subterráneas, y deberá permitir la identificación y caracterización de los sistemas acuíferos y de las unidades impermeables o con limitadas posibilidades de flujo subterráneo, la distribución de los puntos de agua, la dirección regionales de flujo, las condiciones de recarga y descarga, las características hidrogeoquímicas y parámetros hidráulicos, como se ilustra en la figura 18.

El modelo conceptual puede ser representado gráficamente mediante mapas hidrogeológicos en los que se sintetizan las principales características hidrogeológicas, distribución de puntos de agua, curvas de isopiezas, direcciones de flujo, datos hidroquímicos y parámetros hidráulicos. Estos mapas hidrogeológicos podrán estar acompañados de perfiles o cortes, en los que se pueden observar en profundidad, los espesores y las relaciones entre los sistemas acuíferos y unidades poco permeables o impermeables. Estos mapas, deberán ser elaborados de acuerdo con la leyenda acogida por el Servicio Geológico Colombiano -SGC, la cual se basa en la leyenda hidrogeológica internacional, publicada por Wilhdm F. Struckmeier And Jean Margat., 1995

Otro modo de representar gráficamente un modelo hidrogeológico conceptual, es a través de bloques diagramas, que permiten mostrar en términos generales el funcionamiento de los sistemas acuíferos en 3 dimensiones.

CLASIFICACIÓN HIDROGEOLÓGICA

La clasificación hidrogeológica de las diferentes unidades hidrogeológicas se debe hacer con base en los siguientes aspectos:

Características geológicas (litología, aspectos estructurales, geomorfología, espesores, etc.) de las diferentes formaciones.

Características geofísicas de las rocas (valores de resistividad eléctrica, potencial espontáneo y ensayos gamma).

Distribución espacial de las rocas tanto en superficie como en profundidad.

Calidad del agua subterránea.

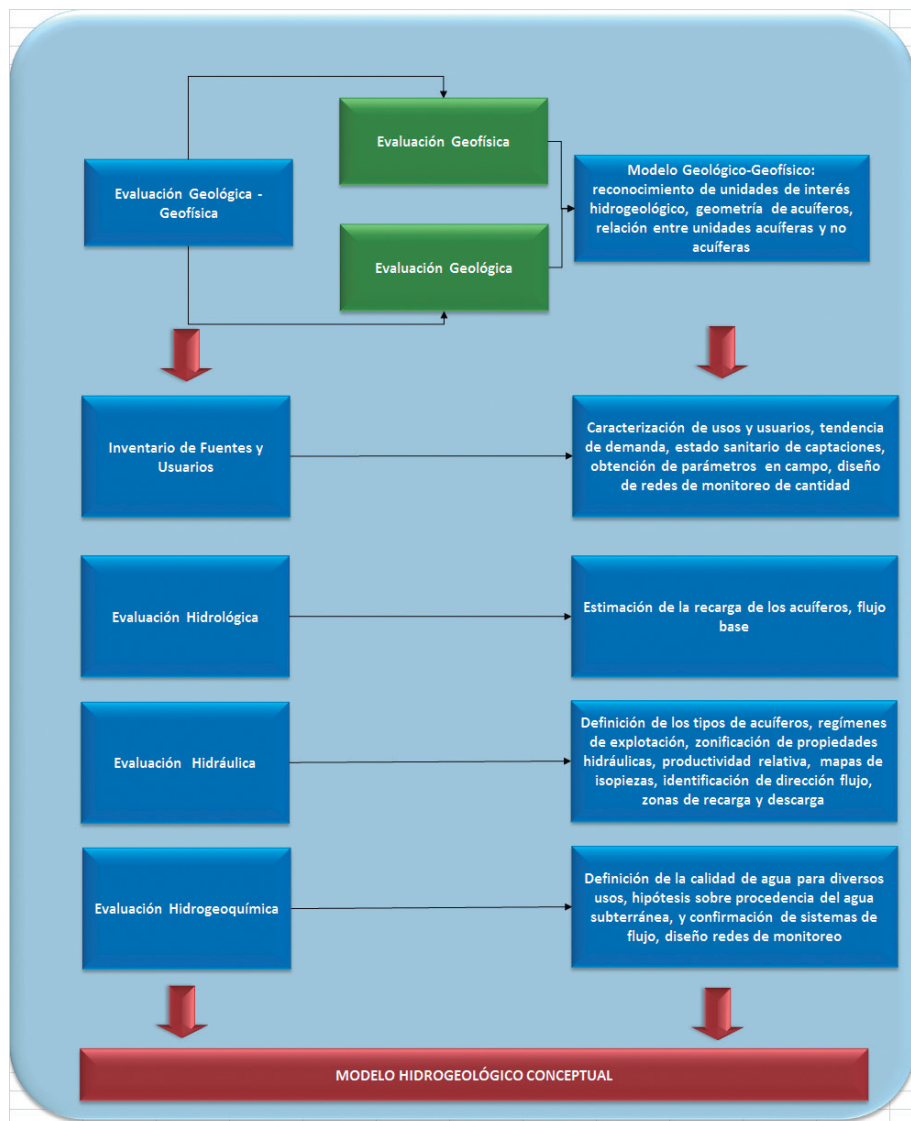
Mapas de isopiezas.

Propiedades hidráulicas de las rocas obtenidas a partir de ensayos de bombeo.

Hidrología.

Recarga por precipitación.

FIGURA 18. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA CONSTRUCCIÓN MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL



Aspectos de Especial Importancia Hidrogeológica

Como resultado de la fase de diagnóstico se deberán determinar las áreas que revisten una especial importancia hidrogeológica y que por tanto, serán objeto de establecimiento de medidas de manejo específicas o de estrategias de protección diferenciales. Entre las posibles áreas de especial importancia hidrogeológica se encuentran las zonas de recarga prioritaria, las áreas con mayor vulnerabilidad a la contaminación, los perímetros de protección de captaciones para abastecimiento público, entre otros.

A continuación se abordarán aspectos generales que servirán de insumo para la determinación de zonas o condiciones de especial importancia hidrogeológica.

Zonas de recarga por precipitación

Frecuentemente no se dispone de toda la información o estudios necesarios para delimitar las zonas de recarga a escala detallada, por lo que puede ser utilizada la cartográfica temática existente incluyendo topografía, suelos, vegetación, geología (con información estructural de zonas de fallas, diaclasas, fracturas), y mapas de isoyetas, para establecer preliminarmente dichas áreas. Esta información puede ser evaluada con la ayuda de sistemas de información geográfica, mediante álgebra de mapas y asignación de pesos específicos a cada variable analizada, los cuales deberán ser establecidos preferiblemente por los técnicos expertos, y siempre teniendo como base el modelo hidrogeológico conceptual.

Los mapas de curvas de isopiezas, la información hidrogeoquímica (distribución de sólidos totales disueltos, conductividad eléctrica, cloruros, entre otros), los estudios isotópicos o incluso el uso de trazadores, serán de gran utilidad para validar la información sobre las zonas de recarga.

En la medida en que se disponga de información confiable para delimitar estas zonas de recarga, ésta deberá ser considerada en los planes de ordenamiento territorial (POT), con objeto de priorizar las zonas de conservación para la regulación hídrica y de fuentes abastecedoras de la población.

En el numeral 4, del artículo primero de la Ley 99 de 1993, dentro de los principios que rigen la política ambiental colombiana, consagra que los páramos, sub-páramos, nacimientos de aguas y zonas de recarga de acuíferos serán objeto de protección especial, lo que favorece la adopción de medidas como la adquisición de predios, el pago de servicios ambientales y la imposición de condicionamientos o restricciones a actividades productivas o desarrollos urbanos. Ardila L., 2012

Análisis de la oferta y la demanda del agua subterránea

Con fin de determinar la cantidad de agua que puede ser extraída del medio subterráneo para abastecer las necesidades de una población sin comprometer la disponibilidad futura, deberán estimarse la oferta, la demanda y, la relación existente entre estas variables. La comparación entre la oferta y la demanda puede realizarse a través de metodologías como la definida en el Resolución 872 de 2006, para el cálculo del índice de escasez, o los nuevos índices planteados por el IDEAM para efectos del establecimiento de la tasa por uso del agua subterránea, o los planteados en las Evaluaciones Regionales del Agua –ERAS, IDEAM, 2013.

Para este análisis, la Autoridad Ambiental con base en los resultados del modelo hidrogeológico conceptual podrá definir si la recarga natural del acuífero debe ser considerada como la oferta disponible o, si es un porcentaje de ésta, como se plantea en el mencionado Decreto, o deben ser consideradas los recursos almacenados en los acuíferos.

Por su parte, la estimación de la demanda que representa el volumen de agua utilizado por las actividades socioeconómicas en un espacio y tiempo determinado, expresado en millones de metros cúbicos, puede calcularse según la siguiente expresión:

Demanda para cada uso = dotación y/o módulo de consumo x cantidad de individuos x (1+ IANC)

Dónde:

Dotación: volumen de agua requerido para el abastecimiento de una población.

Módulo de consumo: es la cantidad de agua que se requiere para el desarrollo de una actividad o la obtención de un producto.

IANC - Índice de Agua No Contabilizada: incluye la pérdida técnica, la pérdida no-técnica y el consumo legal no facturado de agua por parte del prestador del servicio de acueducto.

En este contexto la demanda total corresponde a la sumatoria de las demandas sectoriales de agua, y se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$DT = DUD + DUI + DUS + DUA + DUP$$

Dónde:

DT = Demanda total de agua

DUD = Demanda de agua para uso doméstico

DUI = Demanda de agua para uso industrial.

DUS = Demanda de agua para el sector servicios

DUA=Demanda de agua para uso agrícola

DUP= Demanda de agua para uso pecuario

En la tabla 11, se presentan las variables que deben tenerse en cuenta en el análisis de la demanda para algunos usos del agua.

TABLA 11. VARIABLES Y FUENTE DE INFORMACIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA PARA ALGUNOS USOS

USO	VARIABLES	FUENTES
Consumo humano y doméstico	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Población. ▪ Micromedición. ▪ Dotaciones definidas por habitante en el Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS (MVCT 2000-2010)- y por la Superintendencia de Servicios Públicos. ▪ Volumen de agua usada del acueducto. ▪ Pérdidas en el sistema de captación y distribución (IANC). ▪ Estratificación residencial. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Censos DANE ▪ Información de las entidades de servicios públicos de la zona. ▪ Registros de las autoridades ambientales sobre las concesiones. ▪ Censos prediales. ▪ Sistema Único de Información de Servicios Públicos (SUI) (www.sui.gov.co). ▪ POT.
Agrícola	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Precipitación. ▪ Evaporación. ▪ Tipo de cultivo. ▪ Régimen de riego diario y estacional anual. ▪ Sistema de riego. ▪ Efectividad del sistema de riego. ▪ Características de permeabilidad del suelo. ▪ Módulos de consumo de riego según cultivos y zonas. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Atlas hidrológicos. ▪ Registros históricos. ▪ Ciclos anuales del clima. ▪ Estudios del Ministerio de Agricultura. ▪ Diseños de los sistemas de riego.

USO	VARIABLES	FUENTES
Industrial	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tipo de industria. ▪ Módulos de consumo por unidad de producción. ▪ Tecnología de la industria. ▪ Variables socio – económicas de costo beneficio y rendimientos en las empresas. ▪ Manuales de diseño y funcionamiento de las máquinas que trabajan con hidratación. ▪ Registro de vertimientos de agua. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estudios de consumo de agua por gremios industriales. ▪ Módulos de consumo de las actividades económicas específicas. ▪ Registros de las Autoridad Ambientales sobre las concesiones. ▪ Registros de las empresas de servicios públicos. ▪ Sistema Único de Información de Servicios Públicos (SUI) (www.sui.gov.co). ▪ Censo de industrias.

Fuente: Ministerio de Ambiente y Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010 (b). Informe final Contrato de consultoría individual No. 198 DE 2010 MADS - BIRF, María Victoria Vélez Otálvaro.

Para la estimación de la demanda futura de agua, deben generarse escenarios en los que se considere la variación de la población, las perspectivas socioeconómicas de la zona, las posibles mejoras tecnológicas para el acceso al agua, entre otros aspectos. En los escenarios se deben considerar situaciones probables con condiciones de aumento extremo de la demanda (pesimista), condiciones de minimización del uso del agua (optimista) y además escenarios tendenciales basados en la historia. En la tabla 12, se presenta alguna información clave para la estimación de la demanda futura de agua y la construcción de los escenarios.

TABLA 12. VARIABLES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA FUTURA PARA DIFERENTES USOS

USO	VARIABLES
Consumo Humano y doméstico	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Índices de natalidad y mortalidad. ▪ Índices de crecimiento histórico. ▪ Datos de migraciones. ▪ Estimaciones de desplazamiento poblacional. ▪ Cambio de estratificación de la población. ▪ Expectativas de mejoramiento de los sistemas de abastecimiento.
Riego	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cambios en el uso del suelo. ▪ Cambio en las tecnologías de riego. ▪ Instalación de sistemas de ahorro de agua y optimización del riego. ▪ Expectativas de crecimiento del sector agrícola.
Industrial	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Crecimiento de la industria. ▪ Planes futuros de producción. ▪ Mejoramiento de la tecnología en la empresa. ▪ Planes de reúso del agua. ▪ Proyecciones de crecimiento económico de los municipios. ▪ Proyecciones del índice de precios al consumidor (IPC)

Fuente: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010 (b). Informe final Contrato de consultoría individual No. 198 DE 2010 MADS - BIRF, María Victoria Vélez Otálvaro.

Debe tenerse en cuenta, sin embargo, la incertidumbre asociada a la predicción de la demanda, que según Amaya, G. 2009, está ligada a factores difíciles de establecer, dada su alta variabilidad en tiempo y espacio, en la cual influyen agentes como el crecimiento futuro de la población, el método de proyección de población utilizado, las tasas de crecimiento de la población, el crecimiento económico de la región, la eficiencia en el servicio de agua potable por parte de las empresas de servicio (IANC), el uso eficiente y racional del agua por

parte de los consumidores e incluso componentes tan importantes e inestables como el clima, las situación socioeconómica de la población y sus tendencias culturales.

Vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación

La vulnerabilidad se define como: “las características propias de un acuífero que determinan la facilidad con que un contaminante derivado de actividades antrópicas o fenómenos naturales pueda llegar a afectarlo” (Decreto 1640 de 2012).

Existen diversas metodologías que permiten determinar la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, sin embargo, para efectos prácticos puede consultarse la “Propuesta Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca de los Acuíferos a la Contaminación” (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010. (c)), en la cual se describen algunos de los métodos más empleados para evaluar cargas verticales descendentes (DRASTIC, GOD, SINTACS, EPIK y GALDIT), vulnerabilidad en medios fracturados (EPIK) y para evaluación de cargas laterales como la intrusión marina (GALDIT).

Las metodologías mencionadas en general califican la vulnerabilidad a la contaminación mediante una escala cualitativa que generalmente va desde una vulnerabilidad muy baja o despreciable, hasta vulnerabilidad extrema. En la tabla 13, se pueden observar las definiciones prácticas de las categorías de vulnerabilidad según el documento del Banco Mundial, 2007.

TABLA 13. DEFINICIÓN PRÁCTICA DE CLASES DE VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

CLASE DE VULNERABILIDAD	DEFINICIÓN CORRESPONDIENTE
EXTREMA	Vulnerable a la mayoría de los contaminantes con impacto rápido en muchos escenarios de contaminación
ALTA	Vulnerable a muchos contaminantes (excepto a los que son fuertemente absorbidos o fácilmente transformados en muchos escenarios de contaminación.
MODERADA	Vulnerable a algunos contaminantes sólo cuando son continuamente descargados o lixiviados.
BAJA	Sólo vulnerable a contaminantes conservativos cuando son descargados o lixiviados en forma amplia y continua durante largos periodos de tiempo.
DESPRECIABLE	Presencia de capas confinantes en las que el flujo vertical (percolación) es insignificante.

Fuente: Banco Mundial, 2007. Protección de la Calidad del Agua Subterránea guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales Guía Técnica parte B.

Los mapas de vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, se convierten en una importante herramienta mediante la cual las autoridades ambientales competentes pueden establecer medidas de manejo para la protección de la calidad de las aguas subterráneas. Dentro de estas medidas se pueden incluir las siguientes:

- I. Definición de área en las cuales se deban desarrollar estudios o investigaciones a escalas detalladas;
- II. Densificación de las redes de monitoreo de calidad del agua subterránea en zonas de extrema o alta vulnerabilidad;
- III. Imposición de mayores frecuencias de monitoreo, o aumento de parámetros de control de la calidad del agua subterránea (en pozos o captaciones existentes, o en piezómetros construidos para tal propósito), para actividades potencialmente contaminantes localizadas en zonas con extrema o alta vulnerabilidad.
- IV. Condicionamiento, restricción o prohibición a la localización de nuevas actividades que impliquen almacenamiento, empleo, manufactura o generación de sustancias altamente contaminantes de las aguas subterráneas;

Para el mapeo de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación, se recomienda utilizar los colores propuestos en la Leyenda Hidrogeológica Internacional (Wilhelm F. Struckmeier A, And Jean Margat, 1995).

Inventario de fuentes potenciales de contaminación de las aguas subterráneas

Este inventario debe incluir aquellas fuentes que estén generando o pueden generar lixiviaciones o flujos preferenciales con solutos que alteren la calidad natural de las aguas subterráneas.

Para el desarrollo del inventario, se podrán considerar las etapas propuestas por el Banco Mundial, 2007, que incluyen el diseño del inventario, su implementación y la evaluación y síntesis de resultados. (Véase figura 19).

Para el diseño del inventario, es importante identificar actividades socioeconómicas objeto del ejercicio, las cuales generalmente están relacionadas con el desarrollo urbano, actividades comerciales, industriales, agrícolas, pecuarias o mineras. Con base en esta identificación preliminar, se deben establecer las posibles fuentes de información a consultar.

FIGURA 19. DESARROLLO DE UN INVENTARIO DE FUENTES POTENCIALES DE CARGA CONTAMINANTE AL SUBSUELO



Fuente: Banco Mundial, 2007 Protección de la Calidad del Agua Subterránea guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales Guía Técnica parte B.

Algunas de las principales fuentes potenciales de contaminación de los acuíferos, desagregadas de acuerdo con su origen urbano, industrial, agrícola o minero, así como las principales características de las cargas contaminantes que podrían generarse, se presentan en la tabla 14.

TABLAS 14. FUENTES POTENCIALES DE CONTAMINACIÓN

TIPO DE ACTIVIDAD	CATEGORÍA DE DISTRIBUCIÓN	Principales tipos de contaminantes	CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA CONTAMINANTE	
			Sobrecarga hidráulica	Aplicada debajo de la capa de suelo
(+ indica que aumenta la importancia)				
Desarrollo Urbano				
Saneamiento sin red cloacal	u/r P-D	n f o t	+	+
Cloacas con fugas (a)	u P-L	o f n t	+	
Lagunas de oxidación de aguas residuales (a)	u/r P	o f n t	++	+

TIPO DE ACTIVIDAD	CATEGORÍA DE DISTRIBUCIÓN	CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA CONTAMINANTE		
		Principales tipos de contaminantes	Sobrecarga hidráulica (+ indica que aumenta la importancia)	Aplicada debajo de la capa de suelo
Descarga de aguas residuales en el suelo (a)	u/r P-D	n s o f t	+	
Aguas residuales en ríos influentes (a)	u/r P-L	n o f t	++	++
Lixiviación de rellenos/botaderos de basura	u/r P	o s h t		+
Tanques de almacenamiento de combustibles	u/r P-D	T		
Sumideros de drenaje de las carreteras	u/r P-D	s t	+	++
Producción Industrial				
Tanques/tuberías con fugas (b)	u P-D	t h		
Derrames accidentales	u P-D	t h	+	
Agua de procesos/Lagunas de efluentes	u P	t o h s	++	+
Descarga de efluentes en el suelo	u P-D	t o h s	+	
Descarga hacia los ríos influentes	u P-L	t o h s	++	++
Botaderos de residuos con lixiviación	u/r P	o s h s t		
Sumideros de drenaje	u/r P	t h	++	++
Precipitación aérea de sustancias	u/r D	s t		
Producción Agrícola				
a) Cultivo				
Con agroquímicos	r D	n t s		
Con irrigación	r D	n t s o	+	
Con lodo/ lodo proveniente de agua residual	r D			
Bajo riego con aguas residuales	r D	n t o s f	+	
b) Cría de ganado/procesos de cosecha				
Lagunas de efluentes	r P	f o n t	++	+
Descarga de efluentes al suelo	r P-D	n s o f t		
Descarga hacia ríos	r P-L	o n f t	++	++
Extracción Minera				
Alteración del régimen hidráulico	r/u P-D			
Descarga de aguas de drenaje	r/u P-D		++	++
Aguas de procesos/lagunas de lodos	r/u P-D		+	+
Volcaderos de residuos de lixiviación	r/u P			
(a) Puede incluir componentes industriales		n Compuestos de nutrientes		
(b) Puede ocurrir también en áreas no industriales		f patógenos fecales		
(c) La intensificación representa el principal riesgo de contaminación		o carga orgánica general		
u/r Urbana/rural		s salinidad		
P/L/D Puntual/lineal/difusa		h metales pesados		
		† micro-organismos tóxicos		
		+ Incrementa la importancia		

Fuente: Banco Mundial, 2007 Protección de la Calidad del Agua Subterránea guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales.

En la implementación del inventario de fuentes potenciales de contaminación, además de realizar las visitas en campo, en los casos en que se requiera, y aplicar encuestas diseñadas para capturar información sobre la carga contaminante, se deberán categorizar las fuentes potenciales de contaminación, por tipo de actividad y valorar las cargas contaminantes que pueden convertirse en una amenaza para el recurso hídrico subterráneo. Con este propósito, podrán ser consideradas las siguientes variables definidas por el Banco Mundial, 2007:

- ▶ La clase de contaminante involucrado, definida por su persistencia probable en el ambiente subterráneo y por su coeficiente de retardo relacionado con el flujo de agua subterránea.
- ▶ La intensidad de la contaminación, definida por la concentración probable del contaminante en el efluente o lixiviado, en relación con los valores guía recomendados por la Organización Mundial de la Salud -OMS para la calidad de agua potable y por la proporción de la recarga del acuífero involucrada en el proceso de contaminación.
- ▶ El modo en que el contaminante es descargado al subsuelo, definido por la carga hidráulica (incremento sobre la tasa de recarga natural o sobrecarga hidráulica) asociada con la descarga del contaminante y la profundidad debajo de la superficie del terreno en la cual el efluente o lixiviado contaminado que ingresa es descargado o generado.
- ▶ La duración de aplicación de la carga contaminante, definida por la probabilidad de descarga del contaminante al subsuelo (ya sea intencional, incidental o accidentalmente) y por el período durante el cual la carga contaminante será aplicada.

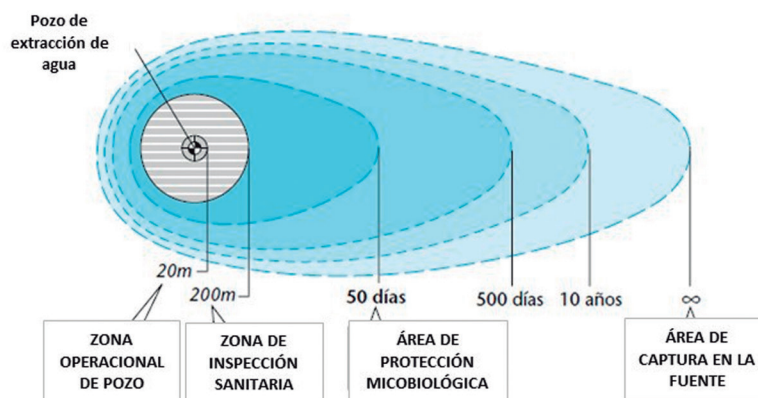
Igualmente podrá ser utilizada alguna de las metodologías existentes para valorar las fuentes potenciales de contaminación, como las planteadas por Foster e Hirata, 1988, Gaviria, J. 2005, CARDER, 2007, Gaviria y Betancur 2005, o Gaviria, J. 2010 en la que se realiza la evaluación de la vulnerabilidad humana.

Perímetros de protección de captaciones

Una de las formas más antiguas de proteger las aguas subterráneas de la contaminación indeseada, es la restricción de ciertas actividades y del uso del terreno en la zona que circunda una fuente de captación de estos recursos hídricos. (Hirata y Rebouças, 1999).

Con estas zonas de restricción o protección, se busca proteger el área que alimenta directamente al pozo, o sea su "zona de captura", la cual es función tanto de las condiciones hidrogeológicas del acuífero, como de los caudales bombeados por los pozos. Existen diferentes niveles de perímetros de protección de pozos que responden a objetivos y criterios diferentes, un ejemplo tomado del Banco Mundial, 2007, plantea cuatro niveles correspondientes a: la zona operacional; la zona de inspección sanitaria; el área de protección microbiológica y; el área de captura total de la fuente. De acuerdo con estos niveles, se definen estrategias de protección de los acuíferos a través de las cuales se podrán prohibir, restringir o, aceptar condicionadamente, la ubicación de ciertas actividades potencialmente contaminantes. (Véase figura 20)

FIGURA 20. PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE POZOS EN UN ACUÍFERO LIBRE



Fuente: Banco Mundial, 2007. *Propuestas Metodológicas para la Protección del Agua Subterránea, Guía técnica parte B,*

Existen muchas metodologías para el trazado de los perímetros de protección de pozos, que van desde restricciones en áreas de radios fijos trazados de forma arbitraria, hasta la utilización de complejos modelos matemáticos o numéricos. La selección de la metodología a utilizar, debe partir de la definición de los objetivos perseguidos y de la disponibilidad de información técnica para establecer estos perímetros.

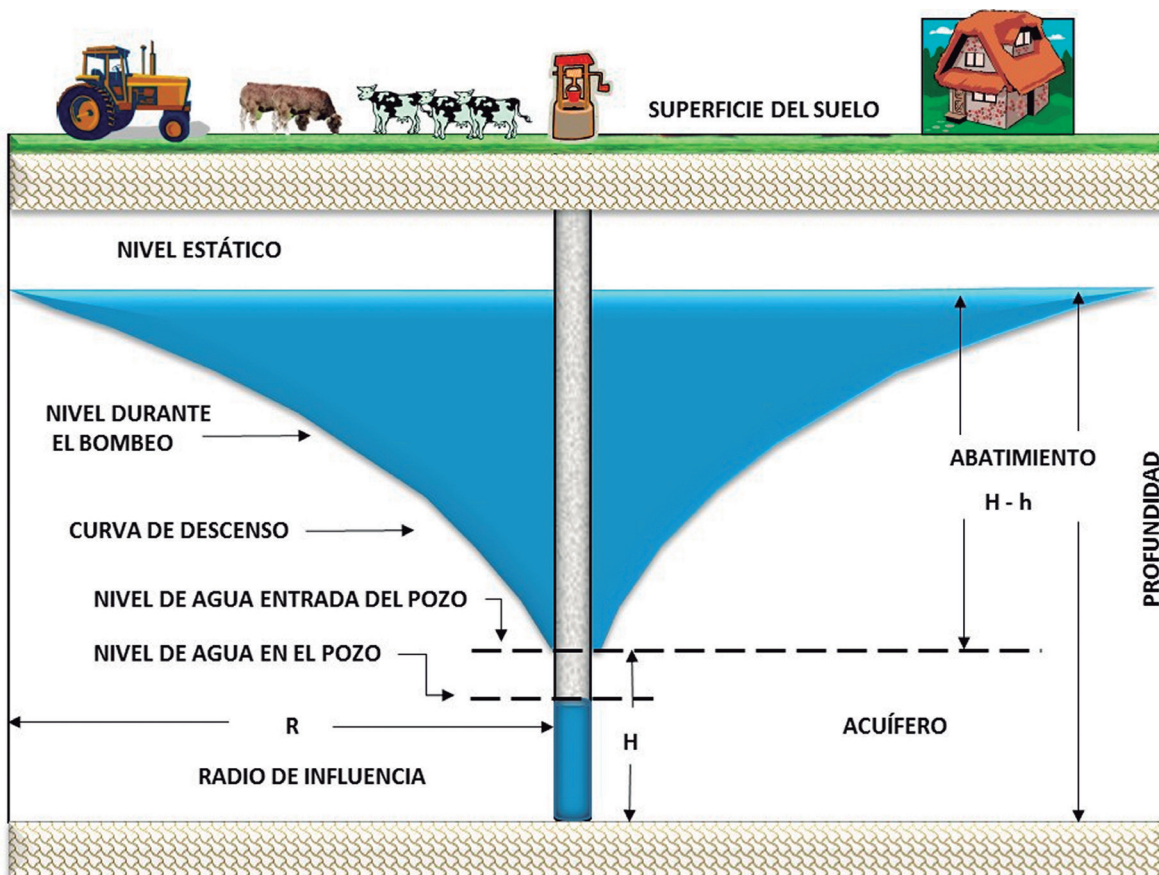
Zonas con interferencia de pozos

Cuando se tiene un pozo y se bombea un determinado caudal, se produce una superficie de abatimiento o descensos del nivel que tiene forma de cono invertido (véase la figura 21). La distancia del pozo a la cual los abatimientos son despreciables con respecto al nivel estático se llama radio de influencia (R).

Si hay varios pozos que estén en funcionamiento al mismo tiempo, se producirá una disminución del caudal que puede ser extraído de cada uno de ellos debido al cruce de las superficies de abatimiento, produciéndose el fenómeno llamado interferencia de pozos. (Véase la figura 22)

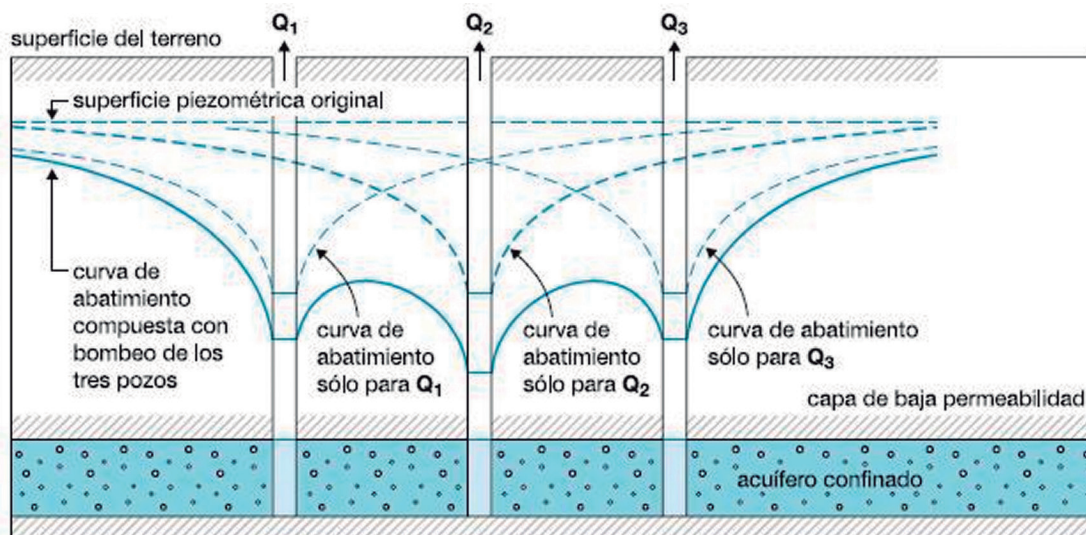
Es importante que se analicen de manera exhaustiva las condiciones que pueden causar interferencia de pozos, ya que pueden ser confundidas en muchas ocasiones con una explotación intensiva o sobreexplotación del acuífero.

FIGURA 21. SUPERFICIE DE ABATIMIENTO DE UN ACUÍFERO



Fuente Modificado de: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010 b.

FIGURA 22. INTERFERENCIA ENTRE POZOS



Fuente: Banco Mundial, 2002-2006 (a). Serie informativa No. 5.

La localización y el seguimiento de los pozos existentes con sus características hidráulicas, caudales, régimen de operación y el permanente chequeo con las ecuaciones analíticas o modelos numéricos pueden prevenir efectos de la interferencia de pozos tales como reducciones excesivas de los niveles piezométricos, afectación de la calidad del agua y hasta la salida de servicio de los pozos someros.

Estos análisis también permitirán a la autoridad ambiental, tomar medidas relacionadas con la reducción de caudales concesionados, establecimiento de horarios diferenciales de bombeo en pozos cercanos.

Diagnóstico Participativo

Este diagnóstico, se realiza a partir de la implementación de la estrategia de participación, definida en la fase de aprestamiento, con la que se busca conocer las expectativas de la población hacia el plan de manejo ambiental de acuíferos, así como las carencias y necesidades en relación con el recurso hídrico subterráneo.

En este sentido, teniendo como base los resultados obtenidos en la fase de aprestamiento, relacionados con la identificación y descripción de sectores y actores sociales clave para el desarrollo del PMAA, se deberá implementar la estrategia de participación la cual será insumo fundamental para la identificación de las problemáticas o amenazas sobre el sistema acuífero y las ideas de proyecto para su prevención o mitigación.

Esta estrategia generalmente se desarrolla a través de talleres o encuentros participativos cuya finalidad se fundamenta en la socialización de la información técnica del PMAA, y en la recolección de información referente a: i) la identificación de roles de los actores sociales y su influencia e importancia en el PMAA (mapa de actores) ii) identificación de amenazas sobre el acuífero y, iii) acercamiento a la definición de escenarios deseables.

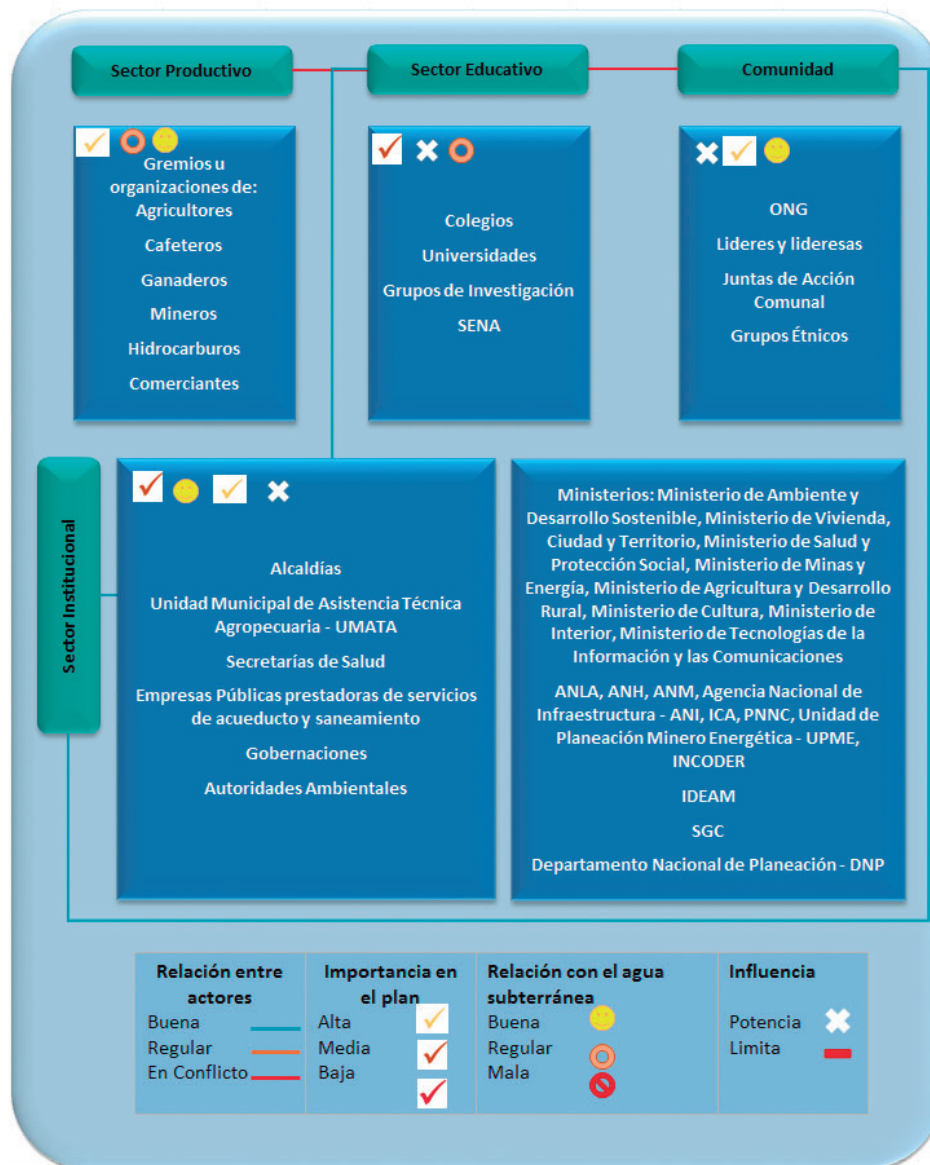
Un ejemplo de un mapa de actores desarrollado para la formulación del plan de manejo ambiental de los acuíferos de la cuenca del río Ranchería, (MADS, Corpogujira, UdeA, 2013) se muestra en la figura 23.

Para la realización de los talleres o encuentros participativos es importante considerar diferentes mecanismos de convocatoria que permitan difundir la información a todos los actores y sectores clave, incluyendo llamadas telefónicas, envío de correspondencia física, correos electrónicos, publicación de carteles en sitios visibles y entrega de información puerta a puerta, entre otros.

Los talleres pueden ser dirigidos a grupos de actores y sectores que por su relación con el agua o rol, tienen un interés específico, conocimiento y/o competencia en el tema, con el fin de orientar los encuentros y facilitar la conformación de un espacio deliberativo y de construcción más eficiente y efectivo. A continuación se presenta la priorización de actores propuesta por la MADS, Corpogujira, Universidad de Antioquia, 2013:

- ▶ Actores con impacto en el recurso hídrico subterráneo.
- ▶ Actores con interés en el tema ambiental desde su competencia o función.
- ▶ Actores que se abastecen de agua subterránea.
- ▶ Actores con competencias legales para su protección.

FIGURA 23. EJEMPLO DE UN MAPA DE ACTORES DESARROLLADO PARA LA FORMULACIÓN DEL PLAN DE MANEJO AMBIENTAL DE LOS ACUÍFEROS DE LA CUENCA DEL RÍO RANCHERÍA



Fuente: Modificada de: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – CORPOGUAJIRA – UDEA, 2013

Identificación de las Problemáticas sobre el Acuífero

A pesar de que existen muchas problemáticas asociadas con el recurso hídrico subterráneo, en este ítem se desarrollarán con especial énfasis, las relacionadas con la contaminación, el desabastecimiento y los posibles conflictos por uso del suelo en zonas de interés hidrogeológico.

Es importante resaltar que al analizar las problemáticas deben considerarse las relacionadas con la falta o escasa capacidad institucional para la gestión del recurso hídrico subterráneo; con las deficiencias de información o de conocimiento, necesidad de ajuste a instrumentos normativos o de comando y control, falta o escasa asignación presupuestal y necesidades de capacitación en temas específicos de hidrogeología, entre otros aspectos.

Riesgos de contaminación y de agotamiento de las aguas subterráneas

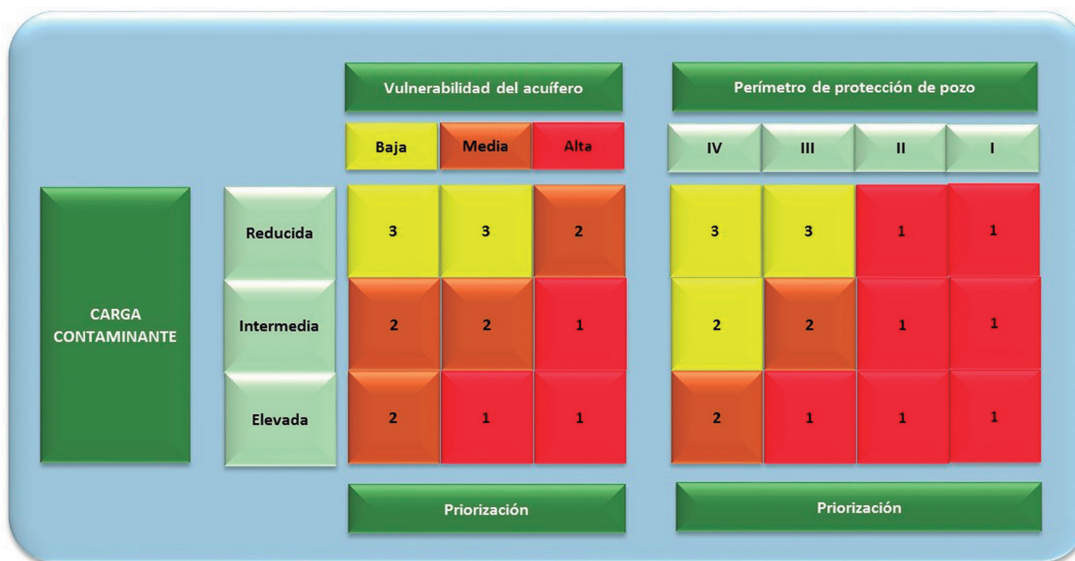
El análisis de los riesgos asociados con el recurso hídrico subterráneo, involucrará necesariamente una interrelación de las variables del componente natural (que condicionan el funcionamiento del sistema acuífero y su respuesta ante factores externos), con las variables sociales, económicas y culturales de una población que puede beneficiarse del recurso, implementar medidas para su protección, o constituirse en una amenaza para la sostenibilidad del mismo en términos de calidad y de cantidad.

El riesgo por contaminación de los acuíferos, se entiende como la probabilidad o posibilidad de que una carga contaminante ingrese al acuífero como resultado de procesos naturales o antrópicos, e impacte negativamente la calidad del agua subterránea. Según MADS, Corpoguajira y Universidad de Antioquia, 2013, las amenazas (cargas contaminantes) naturales se relacionan con condiciones ambientales no inducidas por el hombre, que pueden estar asociadas con la naturaleza química del sustrato litológico o con las fronteras hidrológicas como sucede en las zonas costeras.

El riesgo por contaminación, será el resultado del análisis conjunto de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero, y/o la delimitación de los perímetros de protección de pozos, con el análisis de las fuentes potenciales de contaminación, o amenaza.

En la figura 24, se puede observar la matriz de interacción entre estas variables, mediante la cual se puede establecer una priorización de acciones para control de la posible contaminación y sus efectos sobre los ecosistemas y el hombre.

FIGURA 24. MATRIZ DE INTERACCIÓN DE LA CARGA CONTAMINANTE, LA VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO Y LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE POZOS



3, 2 y 1 son los niveles de prioridad de un programa de protección de calidad del acuífero (del más bajo al más elevado)
 I, II, III, IV son los perímetros de protección (alrededor del pozo); bacteriológico, de productos químicos y de recarga del acuífero.
 BAJA, MODERADA y ALTA VULNERABILIDAD: susceptible solamente a muy móviles y persistentes compuesto incluyendo bacterias y virus respectivamente; reducido, intermedio y elevado se refiere a niveles de cargas contaminantes potenciales

Fuente: Hirata y Reboucas, 1999

En tal sentido, la evaluación de los riesgos por contaminación de aguas subterráneas debe enfocarse en determinar si las cargas contaminantes originadas por las actividades humanas o por procesos naturales pueden afectar la disponibilidad de este recurso para el uso actual o potencial, y a la definición de medidas de manejo relacionadas con la restricción, relocalización y/o prohibición de actividades, al tratamiento de las aguas subterráneas, y/o a la modificación en la destinación del recurso dependiendo de la calidad actual del mismo y/o al cambio en el uso del suelo.

Riesgo por agotamiento

El agotamiento de un acuífero puede considerarse de manera literal como una reducción en el volumen de agua en la zona saturada, independientemente de consideraciones de calidad del agua, o desde otra perspectiva que involucre la reducción en el volumen útil de agua dulce subterránea en el almacenamiento (Konikow y Kendy, 2005).

Algunos de los efectos negativos del agotamiento del agua subterránea por efectos de la explotación excesiva son:

- ▶ Agotamiento de los pozos: esto genera pérdidas de pozos, necesidad de profundizar más las captaciones, aumentar la cabeza de bombeo de la bomba y además disminuir las tasas de rendimiento del pozo.
- ▶ Reducción de agua en cauces, arroyos y lagos: si existe conexión hidráulica entre el agua superficial y el agua subterránea, de tal forma que las fuentes superficiales se mantienen en periodos de estiaje por el flujo de las aguas subterráneas, estas condiciones cambian por completo cuando los niveles descienden. El cambio en las direcciones de flujo del agua subterránea y de la forma como se mueve en el acuífero también pueden afectar las conexiones hidráulicas.
- ▶ El deterioro de la calidad del agua: dos causas del deterioro de la calidad pueden darse, una en los acuíferos costeros por intrusión marina o en acuíferos continentales por bombeo de capas confinadas cercanas, de otros niveles acuíferos o de otro nivel del mismo acuífero de mala calidad o por inducir flujo de corrientes superficiales contaminadas.
- ▶ Aumento de los costos de bombeo: La necesidad del cambio físico en las captaciones y del sistema de extracción por la profundidad de los niveles eleva los costos de extracción de agua. En el caso en que el agotamiento se define por calidad, se pueden generar costos de tratamiento insostenibles.
- ▶ Hundimiento de terreno – subsidencia: por la sobreexplotación los poros del suelo se quedan vacíos, lo que genera fallas en el suelo y posteriores asentamientos en el terreno. Este efecto es irreversible y además de afectar las construcciones en superficie puede colapsar los pozos de explotación de acuíferos.

El problema más difícil en los acuíferos que están sometidos a la explotación es distinguir el agotamiento permanente y regional, del sólo temporal y las interferencias locales causadas por la proximidad de los pozos de producción (UNESCO, 2007)

En la evaluación del riesgo por agotamiento de los recursos hídricos subterráneos se partirá del establecimiento de la relación entre la oferta y la demanda del recurso actual o futura.

En este contexto, el riesgo por agotamiento estará relacionado con una alta demanda de aguas subterráneas que supere la oferta disponible o disminuya las reservas, o con una disminución de la oferta, referente a la tasa de recarga derivada de cambios en el uso del suelo o de reducciones importantes en la precipitación por variaciones naturales o inducidas en el ciclo hidrológico.

Dentro de las condiciones naturales, se puede citar lo relacionado con el cambio climático que tiene impactos como el ascenso en el nivel del mar, los cambios en el régimen de lluvias, tormentas severas más intensas y más frecuentes, sequías cada vez más severas. Estos temas se vienen estudiando y comprendiendo en la medida que se avanza en el conocimiento y se crean nuevos enfoques, herramientas y métodos de investigación.

Para el manejo del agotamiento de acuíferos, Nelson, 2010, propone una estrategia de cuatro pasos:

- ▶ Fortalecimiento de las instituciones estatales.

- ▶ Monitoreo.
- ▶ Procesos de planeación.
- ▶ Utilización de instrumentos económicos

Otro de los aspectos que debe ser considerado es el establecimiento y seguimiento a los programas de uso eficiente y ahorro del agua, establecidos en el Ley 373 de 1997.

Conflictos por usos del suelo en zonas de interés hidrogeológico

En el territorio se desarrollan actividades productivas, económicas y urbanísticas, muchas de las cuales no tienen en consideración las potencialidades y limitantes ambientales, relacionados con zonas estratégicas para la conservación del recurso hídrico subterráneo.

Para la determinación de los conflictos que surgen por esta incompatibilidad, se debe utilizar la información resultante del diagnóstico y del mapa de usos del suelo, con lo que se podrán identificar zonas orientadas a la conservación o al uso sostenible del suelo. El equipo técnico de la Autoridad Ambiental, podrá hacer uso de diferentes metodologías para el análisis de los conflictos, tales como árboles de problemas, matriz DOFA, entre otros, teniendo presente que éstas se deben ajustar al contexto del acuífero y deben permitir que los conflictos ambientales se revisen de manera integral.

2.3. Formulación

En la fase de formulación se definen las líneas estratégicas, los programas, proyectos y actividades a ejecutar por la Autoridad Ambiental competente con el fin de dar solución a las problemáticas y riesgos asociados, identificados en la fase de diagnóstico y con base en los escenarios prospectivos construidos a partir del diálogo entre actores clave.

Las líneas estratégicas son el medio para llegar al escenario deseado, por tanto deben cubrir aspectos ambientales teniendo como referencia los objetivos de la Política Nacional para la Gestión Integral de Recurso Hídrico (oferta, demanda, calidad, riesgo, fortalecimiento y gobernabilidad) e instrumentos (planeación, comando y control, económicos, políticos y normativos, financieros, tecnológicos, sectoriales, institucionales, de información, investigación, sociales), que permitan su ejecución.

Estas líneas estratégicas serán desarrolladas a través de programas, proyectos o actividades y deberán tener un objetivo, una meta cuantificable, medible y alcanzable, un estado de referencia para poder establecer grado de avance, indicadores, frecuencia de medición, responsables y resultados esperados, tal como se presenta en la tabla 15.

TABLA 15. ESTRUCTURACIÓN DE LOS PROYECTOS

LÍNEA DE ACCIÓN	OBJETIVO	META	LÍNEA BASE O ESTADO DE REFERENCIA	INDICADOR	FRECUENCIA DE MEDICIÓN	RESPONSABLE	RESULTADOS ESPERADOS
Línea estratégica 1.							

Líneas estratégicas

Las líneas estratégicas corresponden a las grandes áreas temáticas que agrupan acciones que tienen por finalidad hacer frente a cada una de las problemáticas identificadas relacionadas con el conocimiento, la preservación, conservación y uso sostenible del recurso hídrico subterráneo. En cada línea estratégica se plantean, para conseguir sus objetivos, programas, que a su vez engloban un conjunto de proyectos y actividades específicas.

A continuación se presenta un ejemplo de líneas estratégicas que pueden ser consideradas para la formulación del PMAA.

TABLA 16. EJEMPLOS DE LÍNEAS ESTRATÉGICAS A CONSIDERAR EN LA FORMULACIÓN DE PROYECTOS

LÍNEA ESTRATÉGICA	EJEMPLOS DE PROGRAMAS, PROYECTOS, ACTIVIDADES	DESCRIPCIÓN
Generación de conocimiento e información para la gestión integral del recurso hídrico subterráneo	Implementación de modelos numéricos para la gestión (véase la Guía de Modelación del Recurso Hídrico para Aguas Subterráneas, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2013.b)	<p>Los modelos se utilizan para estudiar la relación entre las aguas superficiales y las subterráneas, simular el comportamiento del acuífero ante eventos climáticos extremos, realizar análisis de transporte de contaminantes, para el diseño de políticas de operación de campos de pozos, la evaluación impactos sobre el acuífero, entre otras.</p> <p>Los modelos numéricos son útiles también para organizar la información disponible, detectar errores en los datos de campo y en los protocolos de monitoreo, para identificar zonas con escasez de información o necesidades especiales de ella, y para refinar el modelo conceptual previamente establecido.</p>
Gestión de la oferta hídrica subterránea	Implementación de redes de monitoreo de niveles	Se utilizan para proveer datos representativos sobre el estado natural y las tendencias del acuífero, con fines de planeación, manejo y toma de decisiones sobre la protección y conservación de las aguas subterráneas.
	Delimitación de zonas de recarga	<p>La calidad y la cantidad del agua subterránea, están estrechamente relacionadas con el uso del suelo que se da en las zonas de recarga, si se tienen identificadas y delimitadas estas zonas se pueden tomar medidas que permitan la sostenibilidad del sistema acuífero, además de impedir efectos negativos sobre éste.</p> <p>Las medidas de protección que se propongan y adopten deben hacer parte de la zonificación ambiental del POMCA, cuando aplique, y por tanto deben considerarse en la clasificación de los suelos en el POT.</p>
	Evaluación de los efectos del cambio climático sobre las aguas subterráneas	Es necesario tener conocimiento de los posibles efectos del cambio climático sobre el sistema acuífero para estar preparados ante cualquier eventualidad y tomar medidas desde ahora.

LÍNEA ESTRATÉGICA	EJEMPLOS DE PROGRAMAS, PROYECTOS, ACTIVIDADES	DESCRIPCIÓN
Caracterización de la demanda	Ejecución o actualización de inventarios de puntos de agua subterránea con empleo del formulario único nacional de inventario de aguas subterráneas.	Estos inventarios o el registro de usuarios permitirán establecer la demanda para los diferentes usos y proyectar las tendencias de uso y evaluar su sostenibilidad.
	Implementación de Registro de Usuarios del Recurso Hídrico Subterráneo (RURH).	
	Establecimiento de programas de uso eficiente y ahorro del agua.	Son utilizados para promover el uso sostenible del recurso mediante la implementación de tecnologías apropiadas y programas de educación ambiental.
	Programas de legalización de usuarios del recurso hídrico subterráneo	Permiten conocer la cantidad de usuarios y establecer medidas para el control del uso del agua por parte de los usuarios.
Reducción de la contaminación del recurso hídrico subterráneo	Redes de monitoreo de calidad	Se utilizan para proveer datos sobre el estado de la calidad del recurso hídrico subterráneo con fines de planeación, manejo y toma de decisiones sobre la protección y conservación de las aguas subterráneas.
	Medidas de manejo en zonas identificadas como de alta vulnerabilidad	Establecen restricciones o condicionamientos en las zonas más susceptibles de contaminación.
	Control y seguimiento de los permisos de vertimiento y planes de cumplimiento.	Los permisos de vertimiento y los planes de cumplimiento son instrumentos que permiten el control de los vertimientos puntuales y difusos a las corrientes y al suelo, realizados por diferentes actividades socioeconómicas como son: las ventas de gasolina, los cementerios, la minería de carbón y los talleres automotrices. Este instrumento está reglamentado por el Decreto 3930 de 2010.

LÍNEA ESTRATÉGICA	EJEMPLOS DE PROGRAMAS, PROYECTOS, ACTIVIDADES	DESCRIPCIÓN
Fortalecimiento institucional y gobernanza	Conformación de un grupo de trabajo para gestión del de recurso hídrico	Para la formulación e implementación del PMAA es necesario que la Autoridad Ambiental cuente con personal calificado.
	Capacitación del personal	Permite contar con personal capacitado y conocedor de las nuevas metodologías y tecnologías en hidrogeología y mejorar el conocimiento de los acuíferos y de los procesos y procedimientos de las autoridades ambientales.
	Educación Ambiental	Es necesario establecer programas de educación que permitan mejorar actitudes de la población ante el recurso hídrico subterráneo y su conservación.
	Adquisición de equipos y software	Es necesario que la Autoridad Ambiental cuente con el equipo básico de campo para labores de reconocimiento y del monitoreo del recurso hídrico, así como de los programas de computador especializados para la interpretación de los datos adquiridos.

Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010 b.

Fuentes de Financiación

En el artículo 65 del Decreto 1640 de 2012, se establece que la autoridad ambiental competente, las entidades territoriales y demás entidades del orden nacional, departamental o municipal, asentadas y con responsabilidades en el área del acuífero, podrán en el marco de sus competencias, invertir recursos en la ejecución de los proyectos y actividades de preservación, restauración y uso sostenible del acuífero. Así mismo, el artículo 41 del mencionado Decreto, establece las diferentes fuentes de financiación.

Los recursos provenientes de las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible competentes, tales como:

- ▶ Las tasas retributivas por vertimientos a los cuerpos de agua.
- ▶ Las tasas por utilización de aguas.
- ▶ Las transferencias del sector eléctrico.
- ▶ Las sumas de dinero que a cualquier título le transfieran las personas naturales y jurídicas con destino a la ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica.
- ▶ Las contribuciones por valorización.
- ▶ Las provenientes de la sobretasa o porcentaje ambiental.
- ▶ Las compensaciones de que trata la Ley 141 de 1994 o la norma que la modifique o adicione.
- ▶ Las tasas compensatorias o de aprovechamiento forestal.
- ▶ Convenio o contrato plan a que se refiere la Ley 1450 de 2011 en su artículo 8 para ejecución de proyectos estratégicos.
- ▶ Los demás recursos que apropien para la ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas.

Recursos provenientes de las entidades territoriales, tales como:

- ▶ El 1 % de que trata el artículo 111 de la Ley 99 de 1993 o la norma que la modifique, sustituya o adicione.
- ▶ Los apropiados en su presupuesto en materia ambiental.
- ▶ Los previstos en materia ambiental en el Plan Nacional de Desarrollo vigente, en relación con los planes para el manejo empresarial de los servicios de agua y saneamiento.

Recursos provenientes de los usuarios de la cuenca hidrográfica, tales como:

- ▶ El 1 % de que trata el parágrafo del artículo 43 de la Ley 99 de 1993 o la norma que la modifique, sustituya o adicione.
- ▶ Los que deban ser invertidos en medidas de compensación por el uso y aprovechamiento y/o intervención -afectación de los recursos naturales renovables.
- ▶ Los no derivados del cumplimiento de la legislación ambiental en el marco de su responsabilidad social empresarial.
- ▶ Los provenientes del Sistema General de Regalías.
- ▶ Los provenientes del Fondo de Compensación Ambiental.
- ▶ Los provenientes del Fondo Nacional Ambiental -FONAM.
- ▶ Los provenientes del Fondo de Adaptación.
- ▶ Los provenientes de los fondos que para tal efecto reglamente el gobierno nacional.
- ▶ Los provenientes de cualquier otra fuente financiera y económica que la autoridad ambiental competente, identifique y deba ser ejecutada por parte de las personas naturales y/o jurídicas que tengan asiento en la cuenca hidrográfica.
- ▶ Los provenientes de donaciones.

Recursos provenientes de la Ley 1454 de 2011

De otro lado en desarrollo de lo dispuesto en el artículo 213 de la Ley 1450 de 2011, las inversiones y costos de los programas, proyectos y actividades definidos en el plan de manejo ambiental de acuíferos, así trasciendan los límites jurisdiccionales, podrán ser asumidos conjuntamente por las autoridades ambientales competentes, y las entidades territoriales.

Priorización

La ejecución de los programas y proyectos pertinentes para la solución de las problemáticas requiere ser priorizada de tal forma que se atiendan los problemas más críticos, y/o aquellos que cambien la tendencia de deterioro de los recursos.

Como ejemplo de priorización se presenta la metodología propuesta por la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín (2008), la cual considera inicialmente todos los proyectos en una misma categoría, sin hacer diferencias de programas o estrategias. Posteriormente define los niveles u objetivos de prioridad, bajo los cuales se categorizarán en orden de importancia los programas y proyectos. Estos niveles no se deben considerar excluyentes, es decir un programa o proyecto puede clasificarse en varios niveles de prioridad.

A continuación se presentan algunos criterios que pueden ser considerados para la priorización:

- ▶ La protección de la vida.
- ▶ El abastecimiento de agua de la población.
- ▶ La calidad de vida.
- ▶ La sostenibilidad de ecosistemas estratégicos.
- ▶ La sostenibilidad del recurso y el medio acuífero.
- ▶ Los conflictos ambientales.

Definición de Indicadores para la Fase de Seguimiento y Evaluación

Según, el Departamento Nacional de Planeación, 2002, un indicador es un conjunto de relaciones entre variables que permiten conocer una situación determinada en forma continua (es un rastro, una señal, una unidad de medida de las variables), a través de los cuales se pueden “observar” y medir los cambios cuantitativos (mayores o menores) y cualitativos (positivos o negativos) que presenta cierta variable, en determinado momento del tiempo o entre periodos de tiempo.

Según el DANE, 2008, la utilización de indicadores se constituye en un instrumento que puede permitir evaluar de manera objetiva aspectos particulares del proceso de ejecución o de los resultados de un programa o proyecto, a través de mediciones de carácter cualitativo o cuantitativo. De igual manera debe permitir un proceso iterativo de información, en términos de que las actividades diseñadas para el cumplimiento de objetivos y metas, puedan ser verificadas y analizadas de manera permanente para proveer elementos de juicio frente a su efectividad en el logro de los fines propuestos.

Para realizar el seguimiento al PMAA, se propone considerar dos tipos de indicadores, los primeros relacionados con el seguimiento a la ejecución de los planes, programas y proyectos, y los segundos, denominados indicadores ambientales, los cuales medirán el impacto de la implementación del PMAA sobre el recurso hídrico subterráneo.

En el primero tipo de indicadores se pueden utilizar los propuestos en el sistema de información del banco de proyectos definido por el Departamento Nacional de Planeación (DANE, 2008), donde se recomienda establecer indicadores de producto (asociados a las metas) e indicadores de gestión (asociados a las actividades).

- ▶ **Indicadores de producto:** cuantifican los bienes y servicios producidos a partir de una determinada intervención. Este tipo de indicador está orientado a medir los productos o metas de cada uno de los programas del PMAA, por lo cual se debe definir un indicador de producto por cada meta propuesta.
- ▶ **Indicadores de gestión:** miden la cantidad de acciones, procesos, procedimientos y operaciones realizadas durante la implementación del PMAA, previos a la generación de los productos esperados. Debe generar un indicador por cada actividad propuesta.
- ▶ **Indicadores de impacto o efecto,** que miden los efectos de la implementación del PMAA, al mediano o largo plazo.

En cuanto a los indicadores ambientales, se pueden establecer indicadores primarios, que permiten detectar y monitorear los problemas más importantes del sistema acuífero, caracterizados por ser medidos de forma sencilla y con tecnología de bajo costo, e indicadores secundarios que corroboran el problema detectado. Así, los indicadores se desarrollan para evaluar (Berger, 1996): 1) presiones sobre el ambiente debidas a la actividad humana, 2) condiciones o estado resultante en el ambiente evaluado y, 3) respuestas políticas para corregir situaciones indeseables (Blarasin, M., A. Cabrera y J. Felizzia, 2002).

Para la selección de los indicadores de presión del agua subterránea se deben tener en cuenta: el contexto del acuífero, el modelo hidrogeológico conceptual, la heterogeneidad geológica, el potencial acuífero, el régimen de flujo, el bombeo de los pozos, la fluctuación de niveles tanto de los piezométricos como de los freáticos, la distribución de pozos existentes en la zona, el régimen de explotación, el fondo geoquímico o condiciones de referencia y, el programa de monitoreo establecido para el seguimiento de la calidad y de la cantidad del agua subterránea.

Se debe definir la frecuencia de medición, la cual estará en concordancia con la duración de cada programa y cada proyecto, a fin de programar adecuadamente la fase de seguimiento y evaluación.

Un ejemplo de uso de indicadores ambientales en Colombia, es el desarrollado por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca -CVC que define indicadores de presión sobre el recurso hídrico subterráneo. (Véase Tabla 17)

TABLA 17. INDICADORES PARA AGUAS SUBTERRÁNEAS VALLE DEL CAUCA

SITUACIÓN AMBIENTAL	INDICADORES PRIMARIOS								INDICADORES SECUNDARIOS	ZONA		Frecuencia (años)
	Nivel de agua	HCO ₃ ⁻	OD	pH	COD	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁼		Saturada - ZS	No Saturada - ZNS	
Cambio en el nivel de agua	X								Descarga de manantiales	X		0.6
Disminución de caudales	X								Descenso en el nivel de bombeo	X		1.0
Impacto urbano		X			X	X	X	X	Compuestos nitrogenados, solventes, metales, etc.	X	X	0.6
Impacto agrícola					X	X			K, Na, PO ₄ , compuestos nitrogenados, pesticidas	X	X	0.6
Impacto industrial		X			X			X	SDT, CE, metales, solventes, DQO, etc.	X	X	0.6
Estado Redox			X			X			Fe ² , HS, sulfatos, compuestos nitrogenados	X	X	0.6
Uso de la tierra/cambio forestal						X	X		% salinidad, C13 y C14	X	X	2.0
Neutralización de ácido		X		X					Al, Ca	X	X	0.6
Salinidad							X		Mg/Cl, O ¹⁸ , H ² , (SDT, Cl, Na)	X	X	0.6
Cambio en la recarga, clima	X						X		O ¹⁸ , H ²	X	X	5.0

Fuente: (Adaptado de PAEZ, 2008). LOS INDICADORES AMBIENTALES DEL AGUA SUBTERRÁNEA VALLE DEL CAUCA-COLOMBIA,

2.4. Fase de Ejecución

En esta fase, se deben emprender las acciones de coordinación institucional necesarias para la implementación de los programas y proyectos que hayan sido priorizados en el escenario temporal para el que fue formulado el PMAA, y para los cuales se hayan asignado o gestionado los recursos financieros requeridos.

Esta implementación de acciones, programas y proyectos, debe llevarse a cabo con el acompañamiento de los actores sociales e institucionales quienes deben asumir el papel que les corresponde de acuerdo con lo señalado en el PMAA.

Las etapas generales para la ejecución del Plan, se muestran en la figura 25.

FIGURA 25. FASE DE EJECUCIÓN EN EL PLAN DE MANEJO AMBIENTAL DE ACUÍFEROS – PMAA



2.5. Fase de Seguimiento y Evaluación

En esta fase, se realizarán el seguimiento y la evaluación del PMAA, con el objeto de definir los ajustes a que haya lugar (Decreto 1640 de 2012), (Véase figura 26)

FIGURA 26. FASE DE SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN EN EL PLAN DE MANEJO AMBIENTAL DE ACUÍFEROS – PMAA



Para el seguimiento del PMAA se deben contemplar los siguientes aspectos:

- ▶ Revisión del cumplimiento de los planes operativo y de acción del PMAA.
- ▶ Revisión a la ejecución de programas y proyectos propuestos: cronograma y presupuesto.
- ▶ Revisión de los logros de los objetivos propuestos: evaluación de indicadores.
- ▶ Implementación y/o ajuste de las estrategias propuestas.

Este seguimiento y evaluación se puede hacer utilizando una serie de herramientas, entre las cuales está el uso de indicadores, como los descritos en el numeral 2.3.4.

El indicador además de proporcionar un resultado, guiará al equipo a cargo del seguimiento y de la evaluación, sobre la forma en que debe adelantar la tarea, motivo por el cual cobra tanta importancia en esta fase. No obstante, se considera que diferentes personas en contextos o entornos diferentes tienen diferentes resultados. Los indicadores deben por lo tanto dar cuenta de distintos lugares, personas, culturas e instituciones, así como procedimientos e instrumentos que sean replicables al interior de los territorios que componen la cuenca y entre cuencas para poder hacer comparaciones a nivel de áreas hidrográficas.

En esta fase es importante que se continúe con los mecanismos y estrategias de participación, las cuales deben estar enmarcadas más allá de los sistemas de monitoreo, en las acciones locales de seguimiento y evaluación de los programas, proyectos y actividades con respecto al agua subterránea y hacer uso de las veedurías ciudadanas para evaluar el cumplimiento de metas, roles y responsabilidades de todos los actores.

Capítulo

3

Como complemento a las orientaciones de carácter metodológico enunciadas en la guía para cada una de las fases que integran el Plan de Manejo Ambiental de Acuíferos, se presentan en los anexos ejemplos de proyectos específicos de caracterización o manejo de aguas subterráneas relacionados con recarga artificial, remediación de acuíferos y caracterizaciones hidrogeológicas para proyectos mineros. Asimismo, se resaltan algunas experiencias de gestión de aguas subterráneas obtenidas en el marco del Proyecto Piloto de Protección Integral de Aguas Subterráneas-PPIAS, el cual se desarrolló con aporte de la Cooperación Internacional del Reino Unido y con la participación del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, INGEOMINAS, CVC Y CORALINA, donde se integraron aspectos técnicos, sociales, económicos, ambientales, legales y de participación de actores relacionados con este recurso. Posteriormente y como réplica del PPIAS, Colombia participó del proyecto Regional de cooperación técnica del OIEA (RLA/8/031), que tuvo como propósito contribuir al mejoramiento del conocimiento hidrogeológico mediante la utilización de las técnicas isotópicas y convencionales con el fin de mejorar la gestión de los recursos hídricos subterráneos. Este proyecto contó con la asesoría técnica y la coordinación nacional del Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS y tuvo como entidades ejecutoras a las Corporaciones Autónomas Regionales, CVC, CORALINA, CARSUCRE, CORPOGUAJIRA y CARDER.

Anexos

1. Proyectos específicos para la gestión de acuíferos

Recarga artificial de acuíferos

La recarga artificial tiene como objetivo el aumento de los almacenamientos naturales de agua subterránea mediante la modificación del movimiento natural de las aguas superficiales utilizando técnicas adecuadas de construcción civil.

La recarga artificial puede hacerse en superficie, infiltración del agua por medio de obras que no están en contacto directo con la zona saturada del suelo como: lagunas de infiltración, zanjas, surcos, riegos por aspersión, o mejorando los lechos de los ríos o en profundidad. En Colombia hay dos experiencias en recarga artificial, una en el río Manzanares en Santa Marta y otra experiencia que aún está en fase piloto en el acuífero de Morroa, Sucre. Las obras de recarga artificial diseñadas y construidas para el acuífero de Morroa se realizan para asegurar la explotación sostenible del acuíferos, dado que según estudios isotópicos no hay recarga natural apreciable. En la isla de San Andrés, en la cual el 85% de la población depende de los recursos hídricos subterráneos para el abastecimiento de agua dulce, se ha contemplado como una medida de manejo de acuíferos, la construcción de sistemas piloto de recarga, con el fin de aprovechar las aguas de escorrentía en la zona del Cove, e impedir que regresen al mar, atenuando a su vez, procesos de erosión. La recarga artificial de acuíferos debe cumplir con criterios de calidad que no afecten el estado actual de las aguas subterráneas.

Remediación de acuíferos

La contaminación del agua subterránea puede comprometer el desarrollo de varios sectores de la sociedad y ha llegado a ser un problema de consecuencias económicas y ambientales importantes. Para afrontarlo existen metodologías que ofrecen la posibilidad de descontaminar parcial o completamente el agua subterránea, o en algunos casos de aislar la zona del agente contaminante, mediante la inmovilización, degradación o transformación de las sustancias contaminantes. La técnicas de remediación pueden ser físicas, físico-químicas o biológicas, las físicas buscan principalmente evitar que el contaminante alcance el agua subterránea, como por ejemplo el uso de barreras; las físico-químicas emplean principalmente sustancias químicas para lograr que se alcancen niveles de contaminación admisibles, mientras que las medidas biológicas consisten principalmente en el uso de los microorganismos naturales (levaduras, hongos o bacterias) existentes en el medio para descomponer o degradar sustancias peligrosas, en sustancias de carácter menos tóxico, o bien inocuas para el medio ambiente y la salud humana.

Los principales métodos para remediar la contaminación en un acuífero son:

- 1) Separación: eliminan la contaminación del subsuelo, e incluyen los métodos de pump-and-treat (bombear el agua contaminada y tratarla afuera), y ventilación del terreno, usada especialmente para contaminación con hidrocarburos procedentes de estaciones de servicio.
- 2) Contención: controlan el movimiento de la contaminación e incluyen barreras físicas como trincheras de lodos y controles hidrodinámicos (campos de pozos).
- 3) Tratamiento. Las tecnologías de tratamiento incluyen la destrucción o transformación de la contaminación mediante reacciones químicas o biológicas, in situ y/o ex situ, o combinaciones.

Caracterización hidrogeológica en los proyectos mineros

La minería representa un serio problema para los acuíferos del país y en general para la preservación del recurso hídrico tanto superficial como subterráneo. Los principales impactos se generan por: (i) extracción del

agua de los acuíferos; (ii) flujos de agua hacia los tajos mineros que producen abatimiento del nivel freático; (iii) contaminación por mezclas con aguas industriales de mala calidad; y (iv), redireccionamiento de flujos y desecación de acuíferos, en minería subterránea (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Para las explotaciones mineras a cielo abierto y de socavón debe considerarse la necesidad del levantamiento de una línea base ambiental del recurso hídrico que incluya los requerimientos que determine la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales – ANLA o la autoridad ambiental regional:

Área de influencia indirecta

- ▶ Identificar los acuíferos de carácter regional, sus zonas de recarga y descarga, direcciones generales de flujo, el tipo de acuífero, calidades y tipos de usos actuales.

Área de influencia directa

- ▶ Realizar el inventario de puntos de agua que incluya pozos, aljibes y manantiales, identificando la unidad geológica captada, su caracterización físico-química y los caudales de explotación.
- ▶ Establecer las unidades hidrogeológicas que intervendrá el proyecto de minero. Igualmente, se deben identificar aquellas unidades que tengan conexión hidráulica con fuentes de agua superficiales.
- ▶ Caracterizar la calidad del agua subterránea.
- ▶ Evaluar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación y definir el riesgo a la contaminación por la actividad minera.
- ▶ Correlaciones geológico - geofísicas, empleando la información geológica, columnas litológicas, registros geofísicos de pozos y demás información temática existente del área.
- ▶ Realizar un modelo geológico-geofísico y generar mapas de isoresistividades a distintas profundidades que permitan diferenciar áreas con condiciones geoeléctricas similares y zonas de interés hidrogeológico, diferenciadas por formaciones geológicas.
- ▶ Ejecución de pruebas de bombeo y presentación de los respectivos datos de campo con duración ajustada a las condiciones de borde existente o de mínimo 24 horas, con su respectivo período de recuperación,
- ▶ Definición de parámetros hidráulicos, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, conductividad hidráulica, permeabilidad, datos de abatimiento, capacidad específica, radio de influencia, interferencia, ecuación de cada pozo.
- ▶ A partir del modelo geológico de la zona, generar un modelo hidrogeológico conceptual que sirva de base para el modelamiento numérico.
- ▶ Generar un modelo numérico, que contemple las interacciones entre los procesos de superficie, la zona no saturada y la zona saturada, en donde se pueda discretizar espacialmente mediante celdas y se puedan cuantificar variables de estado (almacenamiento), intercambios de flujo (evapotranspiración, infiltración, etc.). Dicha estructura de modelación deberán permitir la discretización del dominio espacial en capas. Este modelo debe ser capaz de predecir las alteraciones del comportamiento hidrogeológico frente a las acciones mineras.

A partir de la línea base y conocido el modelo hidrogeológico conceptual y la interacción y/o conexión de las aguas superficiales y subterráneas se debe plantear una red de monitoreo de aguas subterráneas de la zona específica de influencia del proyecto minero. Este monitoreo debe hacerse como mínimo 2 años como insumo para la modelación matemática los pozos seleccionados deberán tener su respectiva nivelación topográfica. Debe realizarse además monitoreo de caudales superficiales de las corrientes principales de la zona, datos que se podrán correlacionar con los niveles piezométricos del acuífero.

La tercera parte de la línea del conocimiento corresponderá al modelo matemático del sistema de acuíferos. El modelo matemático deberá calibrarse con los datos de monitoreo; una vez calibrado se deberán simular los efectos de las condiciones de explotación de la mina, evaluando las posibles afectaciones ambientales al recurso hídrico. Debe además estimarse el volumen de agua que debe ser bombeado para poder mantener los tajos y/o pits de explotación sin agua.

El análisis de los efectos socio-económicos y ambientales de la explotación minera sobre los recursos hídricos debe hacer parte fundamental del diagnóstico.

2. Casos de Estudio

Formulación de Proyectos Piloto de Protección Integrada de Aguas Subterráneas- (PPIAS)

En este anexo se resaltan algunas experiencias de gestión de aguas subterráneas obtenidas en el marco del Proyecto Piloto de Protección Integral de Aguas Subterráneas-PPIAS, el cual se desarrolló con aporte de la Cooperación Internacional del Reino Unido y con la participación del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, INGEOMINAS, CVC Y CORALINA, donde se integraron aspectos técnicos, sociales, económicos, ambientales y legales de las aguas subterráneas, además de la participación activa de actores relacionados con este recurso. Posteriormente y como réplica del PPIAS, Colombia participó del proyecto Regional de cooperación técnica del OIEA (RLA/8/031), que tuvo como propósito contribuir al mejoramiento del conocimiento hidrogeológico mediante la utilización de las técnicas isotópicas y convencionales con el fin de mejorar la gestión de los recursos hídricos subterráneos. Este proyecto contó con la asesoría técnica y la coordinación nacional del Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS y tuvo como entidades ejecutoras a las Corporaciones Autónomas Regionales, CARDER, CARSUCRE, CORPOGUAJIRA y CVC.

En estas regiones las aguas subterráneas son un factor de desarrollo social y económico, ya que en el Valle del Cauca han jalonado la agroindustria, en Sincelejo, Corozal y Morroa son el recurso más importante para el abastecimiento de la población, en San Andrés son fuente de abastecimiento para más del 85% de la población y es importante para el sector turístico, en La Guajira desempeñan un papel fundamental para el abastecimiento de comunidades indígenas y en los procesos de gran minería, y en el sur de Pereira son fuente de agua para el desarrollo de procesos de urbanismo e industriales.

En el siguiente resumen se resalta para cada caso, la característica particular y relevante de la Corporación para el manejo del agua subterránea.

CVC. Un ejemplo a seguir. Manejo integral del recurso hídrico subterráneo

El agua subterránea en el Valle del Cauca es un recurso fundamental para la agricultura, la industria y el abastecimiento de poblaciones y comunidades. Desde finales de 1967 la CVC inició los estudios necesarios para el conocimiento de los acuíferos de la zona. La CVC ha trabajado con un grupo interdisciplinario (hidrogeólogos, perforadores, docentes universitarios, consultores, ingenieros ambientales, economistas, sociólogos y abogados) lo que le ha permitido darle al proceso de gestión y manejo de aguas subterráneas un enfoque integral que tiene principios científicos y tecnológicos sólidos, opciones económicamente factibles, ambientalmente sustentables, socialmente aceptadas e institucionalmente implementables.

La CVC ha realizado estudios hidrogeológicos para la caracterización del acuífero aluvial del valle del río Cauca en dos zonas, la primera al sur, entre Santander de Quilichao y el río Sonso con 4.600 km² de los cuales, 3.000 km² corresponden a tierras planas y 1.600 km² a las estribaciones de las cordilleras Central y Occidental, y la segunda al norte, entre Buga y Cartago con 2.300 km².

Con los estudios hidrogeológicos se identificaron en la zona sur entre los municipios de Candelaria y Buga y en la zona norte -principalmente en los municipios de San Pedro, Tuluá y Bugalagrande un depósito aluvial denominado acuífero del Cauca, con dos niveles acuíferos denominados nivel superior y nivel inferior claramente localizados y de características bien definidas.

El nivel superior localizado generalmente en los primeros 120 m de profundidad del depósito aluvial (denominado unidad A en los estudios hidrogeológicos regionales), está constituido por capas de gravas, cantos rodados y

arenas con intercalaciones de arcillas y limos. Los sedimentos son más gruesos en las partes altas de los conos aluviales de los ríos tributarios del río Cauca y más finos en la parte baja del valle, cerca del río Cauca.

Los pozos que aprovechan el nivel superior del depósito aluvial tienen rendimientos que van desde unos pocos litros por segundo en las partes altas de los conos aluviales, hasta más de 100 l/s en la llanura aluvial, hacia la margen derecha del río Cauca.

El nivel inferior del depósito (denominado unidad C en los estudios hidrogeológicos regionales) se encuentra por debajo de los 180 m de profundidad, está constituido por capas de arenas, gravas y algunas veces cantos rodados, tiene acuíferos confinados que en la mayoría de los casos presentan flujo saltante.

El rendimiento de los pozos que aprovechan los acuíferos de este nivel inferior C es superior a los 100 l/s; la calidad del agua es excelente porque no presenta contaminación bacteriológica y por sus propiedades fisicoquímicas puede ser aprovechada para la mayoría de los usos, con muy pocas restricciones. Este nivel de acuífero sólo está bien definido en las proximidades del río Cauca.

Actualmente en la zona plana del departamento del Valle del Cauca, en un área de 3.400 km² existen aproximadamente 1.400 pozos profundos en operación, de los cuales se extraen entre 400 y 600 hm³/año, que son utilizados para el riego de 123.000 ha, sembradas en caña de azúcar, cultivos transitorios, pastos y frutales, para el suministro de agua a unas 150 industrias que dependen exclusivamente del agua subterránea para su operación y para el abastecimiento público de más de 80 localidades. La mayoría de los pozos están instrumentados con medidores de caudal, por lo que se tienen cifras precisas de los volúmenes de agua. En zonas rurales, en las veredas, donde hay micromedidores, el consumo por usuario no sobrepasa los 12 m³ al mes.

La CVC a través del trabajo de más de 40 años ha podido, con ayuda de herramientas tecnológicas modernas como la utilización de isótopos establecer un modelo conceptual de su área de jurisdicción,

La CVC ha expedido un plan de manejo, abierto a actualización constante. Desde el punto de vista legal expidió el Acuerdo el 042 de 2010 que reglamenta todas las actividades relacionadas con la exploración y explotación del agua subterránea. Todas las resoluciones que ha expedido la CVC están incorporadas en los POT y los POMCA. Una herramienta fundamental son los mapas de vulnerabilidad que permiten declarar zonas de protección y restringir el uso del suelo en ciertas áreas. Todas las resoluciones que expide la CVC se socializan con las oficinas de planeación y con todos los actores involucrados.

Actualmente está enfrentada al reto de estudiar los efectos de la inyección de vinazas en el suelo, lo que los obliga a un estudio con instrumentación completa de la zona vadosa. La investigación sobre el impacto de las vinazas en el suelo y las aguas subterráneas la adelanta la CVC con el gremio azucarero.

El conocimiento del acuífero por parte de la CVC le ha permitido garantizar la sostenibilidad de las aguas subterráneas, asesorar permanentemente a los usuarios del recurso hídrico subterráneo así como ganarse su confianza y respeto.

El área de agua subterránea en la CVC es un modelo de funcionamiento y debería ser política de Estado que toda su experiencia se aprovechara por parte de las corporaciones más jóvenes, por parte de las universidades y otras entidades estatales.

CARSUCRE. Apoyo gubernamental y estrategias exitosas de interacción con la comunidad y los entes territoriales

La principal fuente de abastecimiento de agua de los habitantes del departamento de Sucre es el agua subterránea, la cual es captada por medio de pozos profundos, pozos artesanos y manantiales. El acuífero de Morroa es el principal acuífero del departamento y constituye la única fuente de abastecimiento de agua potable para más de 500.000 habitantes de las zonas urbanas y rurales de los municipios de Ovejas, Los Palmitos, Morroa, Corozal, San Juan de Betulia, Sincelejo y Sampués, incluso parcialmente el municipio del Carmen de Bolívar.

CARSUCRE a principios del 2000 identificó los dos principales problemas que tiene el acuífero Morroa: la sobreexplotación y el peligro de contaminación por actividades antrópicas. La sobreexplotación se determinó por la concentración de pozos en el campo de pozos de Corozal, el bombeo continuo de los pozos y por el descenso continuo del nivel del agua, el cual registró en el año 2000 una tasa de descenso de 4 m/año en la mayoría de los pozos y en el año 2003 de hasta 17 m/año, poniendo en serio peligro la sostenibilidad del recurso. Teniendo en cuenta la problemática del acuífero y estos antecedentes, la Corporación Autónoma Regional de

Sucre -CARSUCRE, diseñó y desarrolló el Proyecto de Protección Integral de Aguas Subterráneas, que tiene como objetivo principal un manejo sostenible del acuífero. Los principales objetivos de este proyecto eran: controlar los descensos de los niveles estáticos y dinámicos, disminuir los desechos sobre áreas de recarga y alrededor de los pozos, disminuir las cargas contaminantes, sellar pozos abandonados y habilitar algunos como piezómetros, reducir las pérdidas en sistemas de conducción y distribución de aguas y un mejoramiento en procesos de planificación.

La Corporación implementó un completo un programa de educación ambiental y de participación de la comunidad con los siguientes resultados:

- ▶ Toma de conciencia de la comunidad acerca de su papel en la disminución de la contaminación del acuífero
- ▶ Conocimiento del valor del recurso hídrico subterráneo y la necesidad de protegerlo
- ▶ Disminución del consumo y aumento del uso eficiente del agua
- ▶ Socialización continua de investigaciones y amenazas sobre el acuífero
- ▶ Integración total de las partes técnica, legal, económica, social y ambiental

FIGURA 1. ESCENARIO DE MANEJO SOSTENIBLE DEL ACUÍFERO



Fuente: Herrera, H. 2010.

Además, hay un gran compromiso de los directivos con la formulación e implementación de los planes de manejo del agua subterránea de los acuíferos Morroa, Morrosquillo y Toluviéjo. Han aprovechado muy bien la cooperación internacional, los recursos propios, recursos de la nación y del Fondo de Compensación Ambiental -FCA, lo que se ha traducido en excelentes equipos, capacitación del personal, contratación de técnicos, ingenieros y trabajadores sociales, y el manejo integral de las partes técnica, financiera y legal.

Las vinculaciones de la Universidad de Sucre y de la Universidad de Antioquia le han permitido a CARSUCRE, con recursos limitados, hacer investigación aplicada en temas clave como: recarga artificial, manejo de acuíferos costeros, e integrar, comprometer y capacitar a la comunidad de la región en los temas relacionados con el agua subterránea. Las experiencias en el acuífero de Morroa las están replicando en el acuífero costero del Golfo de Morrosquillo y en el acuífero cástico Toluviéjo, en los Montes de María.

CORALINA. Un acuífero enfrentado a los retos de los fenómenos climáticos

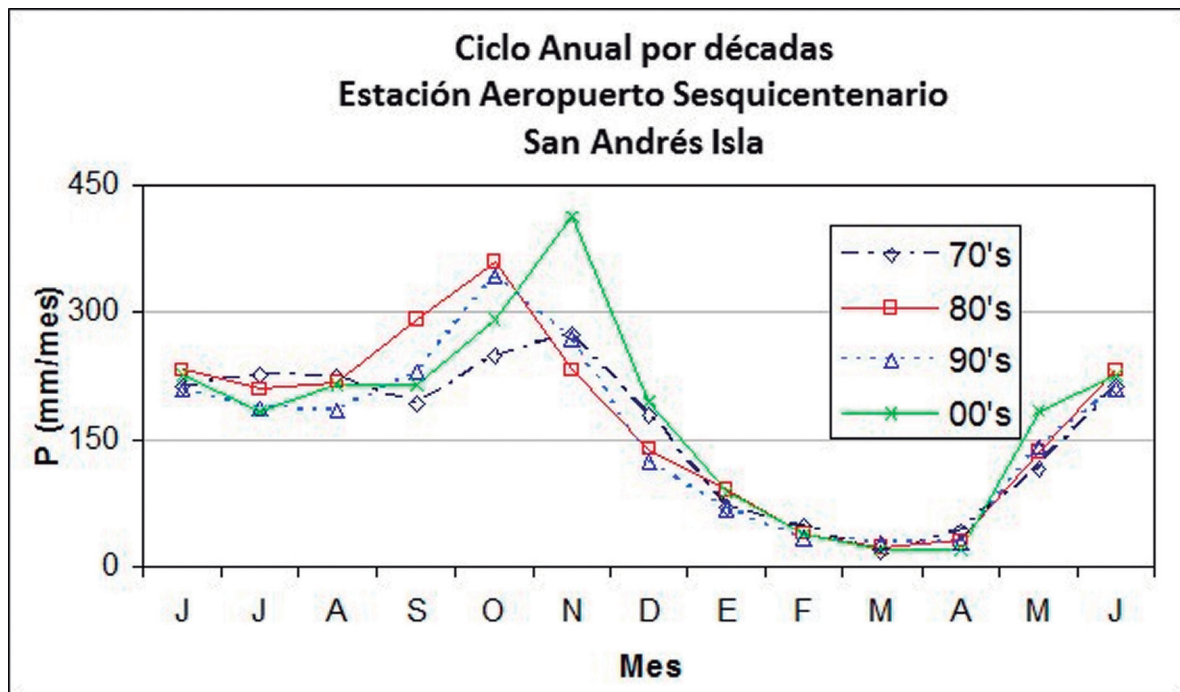
La isla de San Andrés, con una extensión de aproximadamente 26 Km² y una población actual de 65.000 habitantes depende en la actualidad en más de un 80%, del agua subterránea para su abastecimiento. En el año 2000 se planteó el Plan de Manejo de Aguas Subterráneas de la Isla donde uno de los instrumentos de planificación era implementar el modelo numérico.

A nivel físico el acuífero insular de San Andrés presenta gran complejidad con características de anisotropía y heterogeneidad debida a sus condiciones cársticas. La isla de San Andrés está compuesta básicamente por dos unidades hidrogeológicas, la formación San Luís y la formación San Andrés, ambas de edad Terciaria y origen coralino.

La interfaz acuífero-mar adiciona complejidad al fenómeno, dada las diferencias de densidad entre los dos fluidos: agua dulce - agua salada. Las variaciones climáticas afectarían la calidad del agua subterránea, por intrusión salina, y la cantidad, por reducción de la precipitación total y aumento de la temperatura media, con el consiguiente aumento de la evapotranspiración, lo cual podría causar decrecimiento en los volúmenes de recarga.

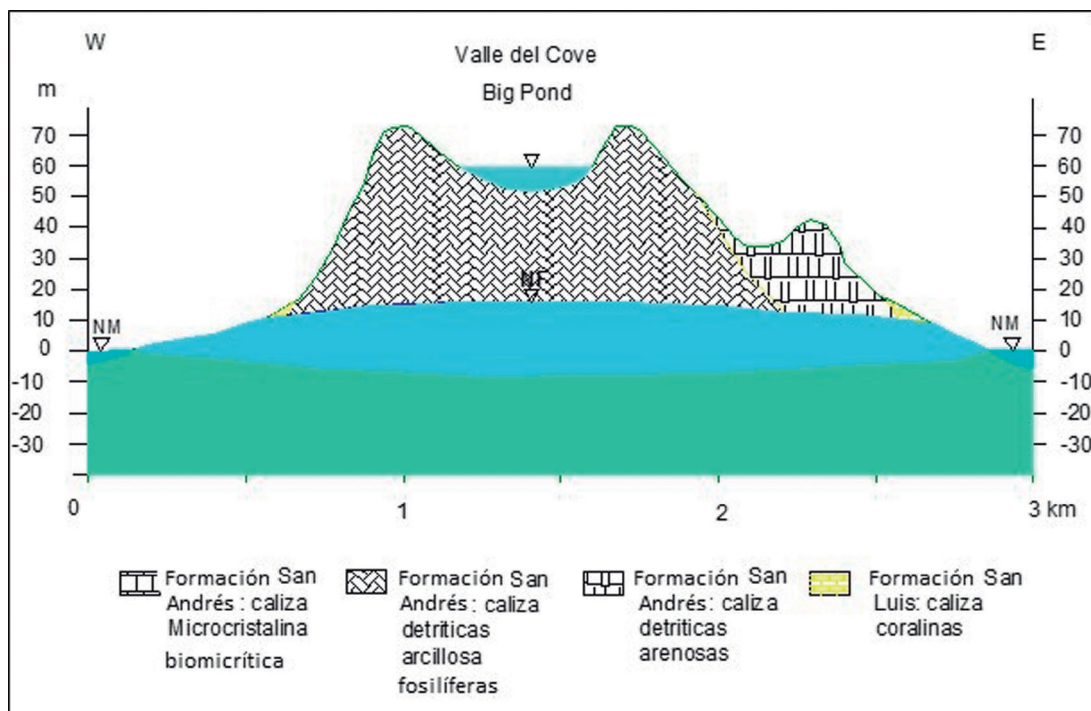
Se detectó que el fenómeno macroclimático ENSO - El Niño-Southern Oscillatio, influye fuertemente en el ciclo anual de lluvias, con diferencias importantes que afectan directamente la recarga del acuífero; durante la fase cálida (años El Niño) se presentan en general menos lluvias respecto a un año normal promedio, mientras que en la fase fría (años La Niña) las lluvias aumentan respecto a un año normal promedio. La figura 2 muestra el ciclo anual por décadas en la estación pluviométrica del aeropuerto.

FIGURA 2. CICLO ANUAL POR DÉCADAS DE LA ESTACIÓN AEROPUERTO EN SAN ANDRÉS



Fuente: UNAL, 2010

FIGURA 3. CORTE HIDROGEOLÓGICO DE SAN ANDRÉS



Fuente: UNAL, 2010

Por intermedio de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, se construyó el modelo para San Andrés, con un análisis robusto del comportamiento de los acuíferos de la isla ante escenarios de fenómenos climáticos. En dicho estudio se hizo énfasis en la utilidad de proyectar diferentes escenarios de recarga, aumento del nivel del mar y extracción, para traducirlos en un modelo de diferencias finitas, llamado SEAWAT, 2000, que permitió simular el flujo de aguas subterráneas y estimar la respuesta total del acuífero en cada caso, buscando garantizar la sostenibilidad a largo plazo del recurso hídrico.

Este modelo se terminó en el 2009 y le permitirá a la Corporación: tener un inventario completo, actualizado, organizado y sistematizado de toda la información que posee, recolectada desde 1940, a nivel geológico, hidrológico, hidrogeológico, hidroquímico, demanda y oferta de agua. Además constituye una poderosa herramienta para la gestión del recurso, dándole argumentos técnicos a la Corporación para otorgar nuevas concesiones, definir políticas de operación de pozos, análisis de escenarios y argumentos técnicos fuertes para analizar la pertinencia del uso de otro tipo de fuentes tales como las aguas lluvias, desalinizadas y aguas saladas.

CARDER. Programa para controlar derrames de hidrocarburos en estaciones de servicio

A pesar de que el agua subterránea no es la principal fuente de abastecimiento en la región, en algunas zonas de expansión urbana al sur de Pereira como Tribunales-Cerritos-Puerto Caldas, su uso es esencial, debido principalmente al empobrecimiento de la calidad de las aguas superficiales de las partes bajas de las cuencas, convertidas muchas veces en agentes receptores de residuos líquidos y sólidos.

Con este panorama, CARDER a través de su participación en el Proyecto de Protección Integrada de Aguas Subterráneas en Colombia, se propuso adquirir las herramientas técnicas, sociales y administrativas que le permitieran gestionar el uso racional y sostenible de las aguas subterráneas, propendiendo por garantizar a generaciones actuales y futuras su conservación en términos de calidad y cantidad.

El proyecto que cubrió los municipios de Pereira y Dosquebradas, y parte de Santa Rosa de Cabal y de Marsella, con un área de 890 Km², se basó en la construcción de un modelo hidrogeológico a partir de la exploración

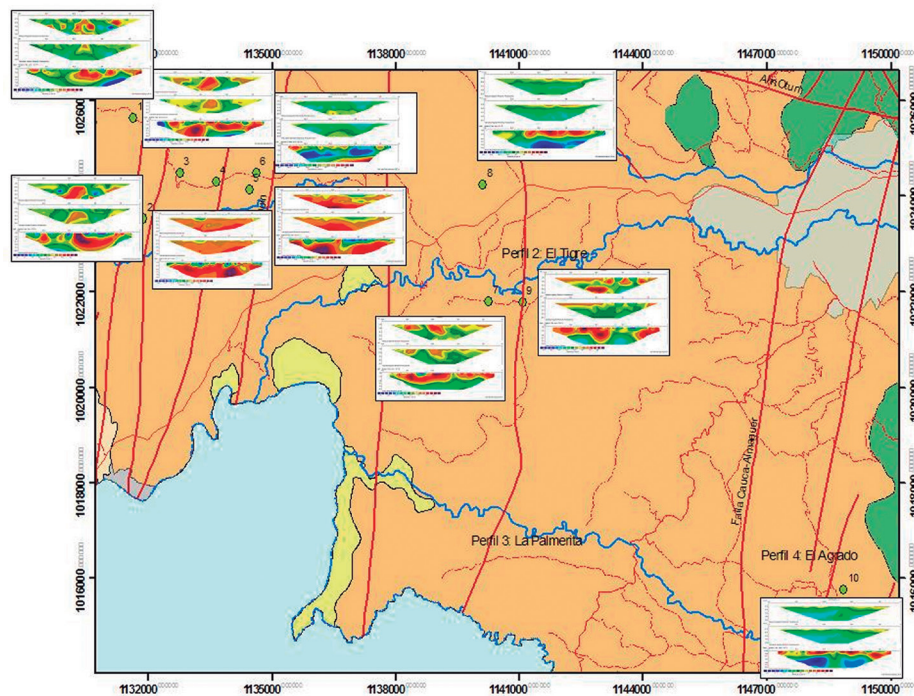
geofísica con empleo de múltiples métodos (gravimetría, tomografías eléctricas y sísmica), la realización de 15 ensayos de bombeo, la caracterización hidrogeoquímica e isotópicos. Este modelo permitió identificar las zonas de recarga, los sistemas y direcciones de flujo, la estimación de demanda de agua subterránea y el mapeo de la vulnerabilidad intrínseca para la zona de estudio, entre otros aspectos.

Con los resultados de hidrología isotópica, (^{18}O y 2H) se confirmó la presencia de aguas derivadas de una fuente de recarga con características homogéneas, situada probablemente a una altura inferior a los 2000 metros. Los resultados de los análisis de ^{14}C y 3H indican que el tiempo de residencia de estas aguas es inferior a unos 50 años. Este rápida recarga y flujo del agua subterránea hace que el acuífero sea vulnerable a la contaminación.

Teniendo en cuenta los anteriores resultados, que muestran una alta dinámica en el acuífero de Pereira, que puede traducirse en una mayor sensibilidad a afectarse por agentes contaminantes dispuestos en superficie, CARDER enfoca la gestión hacia el ajuste e implementación de instrumentos técnicos, legales y administrativos, eficaces para la preservación la calidad de agua del acuífero.

Por lo anterior, CARDER emprendió una campaña para que las estaciones de servicio de combustible actualizaran la línea base ambiental, revisaran y actualizaran los planes de contra derrames de hidrocarburos y realizaran las adecuaciones técnicas y tecnológicas necesarias para prevenir la contaminación de los recursos naturales renovables, en especial el agua subterránea. Este proyecto mostró excelentes resultados no sólo en el área del proyecto, sino en toda su jurisdicción de la CARDER, por lo que este tipo de acciones, merece ser replicada por las otras corporaciones.

FIGURA 4. ANÁLISIS DE TOMOGRAFÍAS EN LA ZONA DE ESTUDIO



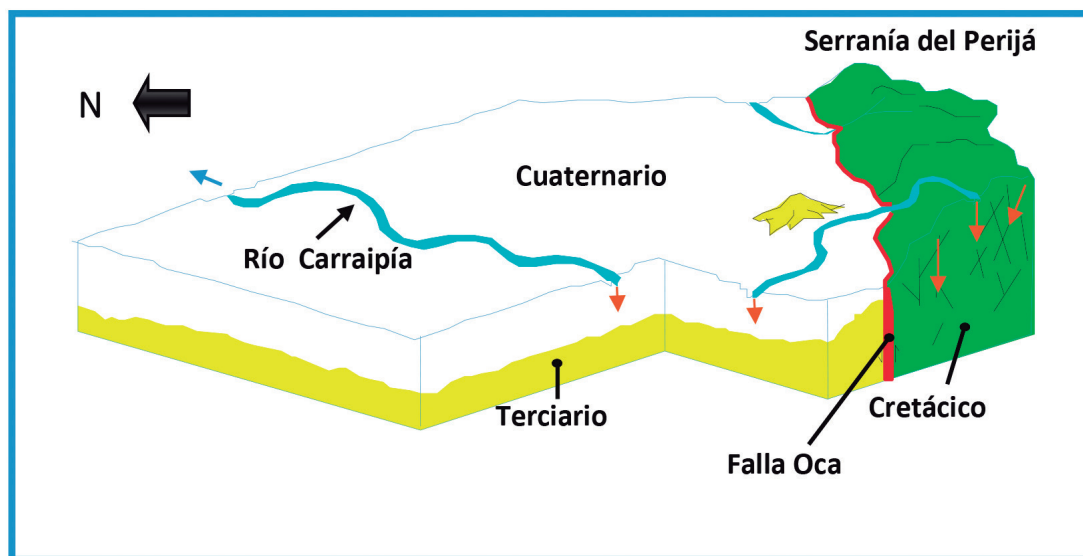
CORPOGUAJIRA. Desafío ante los efectos de la minería

Tal vez en ninguna región de Colombia sea tan importante para la población en general un buen manejo de los recursos hídricos subterráneos como en La Guajira. CORPOGUAJIRA ha adelantado varios estudios conducentes a la formulación del plan de manejo de aguas subterráneas en Maicao; la figura 5 muestra el modelo hidrogeológico conceptual para el acuífero de Maicao. CORPOGUAJIRA actualmente está empezando los primeros estudios para las cuencas de los ríos Tapias y Ranchería.

Enfrenta la Corporación un gran desafío con los efectos que la gran minería produce en las aguas de su territorio: cada vez es mayor la demanda de carbón por parte de otras naciones y cada vez más territorio se verá afectado

por estas explotaciones, que no sólo afectan las aguas subterráneas, sino aguas superficiales como las del río Rancherías. Es necesario un gran fortalecimiento técnico de la Corporación para que pueda enfrentar con éxito estos retos y para que la comunidad no sea afectada.

FIGURA 5. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE CORPOGUAJIRA, 2006.



Fuente: Corpoguajira

CUENCA DEL RIO RANCHERÍA – Primera fase de formulación participativa del Plan de Manejo Ambiental – PMA de los acuíferos de la cuenca del río Ranchería

En cumplimiento de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en convenio con Corpoguajira y la Universidad de Antioquia, apoyó durante el 2013, la primera fase de la formulación del Plan de Manejo Ambiental de los Acuíferos de la Cuenca del Río Ranchería, región que cubre cerca del 20.5% de la superficie total del territorio guajiro, y que abarca zonas urbanas de los municipios de Distracción, Fonseca, Barrancas, Albania, Hatonuevo, parcialmente Riohacha, y zonas rurales de los municipios de San Juan del Cesar, Maicao y Manaure.

En esta zona el agua subterránea reviste vital importancia, ya que se constituye en fuente de abastecimiento para cerca de 60.000 pobladores de la cuenca (realizado a través de aproximadamente 1640 captaciones); y es un bien natural que soporta los flujos base de corrientes superficiales, así como el hábitat de ecosistemas dependientes de los flujos subterráneos, cuyo sostenibilidad es trascendental para la prevención de impactos de la desertificación y del cambio ambiental, en este acuífero costero.

Este esfuerzo conjunto de la institucionalidad nacional, regional, la academia y los actores y sectores claves, permitió en primera instancia la consolidación de la línea base técnica con la que se identifica la existencia de sistemas acuíferos libres y multicapa, distribuidos en dos zonas con características geomorfológicas, geológicas e hidrológicas claramente diferenciadas a norte y sur de la falla de OCA, rasgo estructural que parece además dividir no solo el entorno físico, sino la percepción que los pobladores tienen sobre el origen e importancia de estos recursos hídricos, y sobre las problemáticas que los atañen.

Asimismo, el diagnóstico participativo que fue construido como resultado de los talleres realizados en la región con actores y sectores claves, permitió establecer de manera colectiva una priorización de acciones que deben emprenderse para hacerle frente a las principales amenazas para la sostenibilidad de los recursos en la región, y que se consolidan en unas líneas estratégicas, para las cuales se deben estructurar los mecanismos para hacerlos viables y para hacer seguimiento y acompañar su ejecución.

5. CARACTERÍSTICAS DE LOS POZOS Y ALJIBES

Datos de la construcción:

Fecha _____

Perforador _____

Diámetro exterior _____ pulg

Diámetro interior _____ pulg

Diámetro de la perforación _____ pulg

Profundidad _____ m

Largo: _____ m Ancho: _____ m

Está colapsado? _____ Está colmatado? _____

Material de revestimiento:

Acero y tipo

Hierro Galvanizado

PVC

Otro Cuál?: _____

Ninguno

Piedra

Ladrillo

Madera

Cemento

Otro Cuál? _____

Características de explotación:

Método de extracción del agua:

Bomba sumergible

Bomba manual

Molino de viento

Compresor

Motobomba

Surgencia natural

Manual

Tipo energía

Eléctrica

Gasolina

ACPM

Eólica

Otra Cuál?: _____

Clase de bomba: _____ Modelo: _____ Potencia _____ HP

Profundidad del punto de succión _____ m Tubería descarga: Diámetro _____ pulg Longitud _____ m Material _____

Diseño del Pozo: Diámetro y ubicación de Filtros

TRAMO	DIAMETRO	PROFUNDIDAD		
		DESDE	HASTA	
1				m
2				m
3				m

Se anexa: Columna litológica Diseño del pozo Pruebas de bombeo Registros geofísicos Análisis químico

Características hidráulicas:

Régimen de bombeo: _____ Horas / día _____ días / semana

Nivel medido del agua _____ m Tiempo de bombeo _____ Horas Tiempo desde el apagado de la bomba _____ minutos

Método de medida del nivel del agua Sonda eléctrica Cinta métrica Estimado Transductor de presión-diver

Método de medida del caudal:

Volumétrico (l/s)

Vertedero (l/s)

Micromolinete (l/s)

Estimado (l/s)

Orificio (l/s)

Manómetro

Macromedidor

Micromedidor

Aforo volumétrico:

No.	VOLUMEN (l)	TIEMPO (s)	CAUDAL (l/s)
1			
2			
3			

Caudal (l/s): _____

Caudal estimado:

Volumen del sistema de almacenamiento _____ m³

Tiempo de llenado _____ minutos

Caudal Estimado _____ l/s

6 CONSTRUCCIONES ADICIONALES DE LA CAPTACIÓN

Tipo de construcción	Diámetro (m)	Largo (m)	Ancho (m)	Profundidad (m)	Capacidad (m ³)
Embalse					
Tanque					
Alberca					
Tubería		pulg			
Otro-Cuál?					

7. CARACTERÍSTICAS DE LOS MANANTIALES

Tipo de manantial Goteo <input type="checkbox"/> Filtración <input type="checkbox"/> Otro-Cuál? _____	Permanencia Perenne <input type="checkbox"/> Estacional <input type="checkbox"/> Intermitente <input type="checkbox"/> Sin información <input type="checkbox"/>	Medio de surgencia Rasgo kárstico <input type="checkbox"/> Diaclasas o Fracturas <input type="checkbox"/> Contacto <input type="checkbox"/> Otro-Cuál? _____	Observaciones: _____ _____ _____
---	--	---	--

8. PARAMETROS FISICO-QUIMICOS DEL AGUA

Método de muestreo Manual <input type="checkbox"/> Bombeo <input type="checkbox"/> Otro-Cuál? _____	Propiedades físico químicas: pH: _____ Conductividad Eléctrica (µS/cm): _____ Temperatura (°C): _____ SDT (mg/l): _____ Redox -Eh: _____	Propiedades Organolépticas: Color: <input type="checkbox"/> Incoloro <input type="checkbox"/> Amarillo <input type="checkbox"/> Café <input type="checkbox"/> Otro <input type="checkbox"/> Apariencia: <input type="checkbox"/> Clara <input type="checkbox"/> Turbia <input type="checkbox"/> Otra <input type="checkbox"/> Olor: <input type="checkbox"/> Inolora <input type="checkbox"/> Fetida <input type="checkbox"/> Otra <input type="checkbox"/>	Cuál? _____
---	--	---	-------------

Muestra para laboratorio SI NO

Tipo de análisis Físico-químico Microbiológico Isotópico

Lugar de muestreo Boca de pozo Tanque Llave Nacimiento Otro

Problemas de calidad _____

9. USOS DEL AGUA

Actividad económica:

Uso del agua Abastecimiento público <input type="checkbox"/> Uso doméstico <input type="checkbox"/> Agrícola <input type="checkbox"/> Pecuario <input type="checkbox"/> Recreativo <input type="checkbox"/> Industrial <input type="checkbox"/> Transporte <input type="checkbox"/> Otro <input type="checkbox"/>	Descripción del uso del agua: No. de usuarios _____ No. de usuarios _____ Area regada, ha _____ Tipo de Cultivo _____ Tipo de animales: _____ Número de animales: _____ Usuarios / año _____ ¿Cuál? _____ ¿Cuál? _____	Tipo de Cultivo _____ Número de animales: _____ Usuarios / año _____ ¿Cuál? _____ ¿Cuál? _____	Tipo de Cultivo _____ Número de animales: _____ Usuarios / año _____ ¿Cuál? _____ ¿Cuál? _____
--	--	--	--

Fuentes de abastecimiento

Fuente principal de abastecimiento _____

Fuentes secundarias de abastecimiento _____

Frecuencia de abastecimiento (racionamiento) _____

10. DIAGNOSTICO SANITARIO DE LA CAPTACION

		Distancia		
Existe una letrina	SI	NO		m
Charco de agua estancada	SI	NO		m
Basura, criaderos o estiércol de ganado a su alrededor?	SI	NO		m
Borde o grieta que permita el ingreso de agua superficial al mismo?	SI	NO		m

Condición del punto

Tiene cubierta adecuada	SI	NO	Piso de cemento alrededor de la captación	SI	NO
Tiene sello sanitario	SI	NO	Cerco alrededor de la instalación adecuado	SI	NO

Fuentes puntuales de contaminación:

	Distancia, m
Cementerio	
Estación de servicio	
Lavadero de carros y motos	
Pozo abandonado	
Residuos sólidos	
Residuos peligrosos	
Campo de infiltración	
Plantas de sacrificio	
Lagunas de oxidación	
Otro- Cuál?	

Residuos sólidos:

	Origen	Doméstico	Industrial	Agrícola	Ganadería	Hospitalario	Minero	Otro-Cuál?
Disposición		Residuos especiales	Incineración	Compostaje	Botadero cielo abierto	Reciclaje	Otro-Cuál?	

Observaciones _____

Capítulo

4

Siglas y Acrónimos

Bibliografía

Glosario

Leyes y Decretos

Páginas Web

Siglas y Acrónimos

- ▶ Asociación Nacional de Empresarios de Colombia -(ANDI)
- ▶ Agencia Nacional de Hidrocarburos- (ANH)
- ▶ Agencia Nacional de Minería -(ANM)
- ▶ Center Merged Analysis of Precipitation -(CMAP)
- ▶ Climate Anomaly Monitoring System -(CAMS)
- ▶ Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria -(CORPOICA)
- ▶ Corporación Autónoma Regional de Sucre -(CARSUCRE)
- ▶ Corporación Autónoma Regional de La Guajira -(CORPOGUAJIRA)
- ▶ Corporación Autónoma Regional de Risaralda -(CARDER)
- ▶ Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca -(CVC)
- ▶ Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina – (CORALINA)
- ▶ Corporaciones Autónomas Regionales (CAR)
- ▶ Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE)
- ▶ El Niño-Southern Oscillation (ENSO)
- ▶ Fondo de Compensación Ambiental -(FCA)
- ▶ Fondo Nacional Ambiental -(FONAM)
- ▶ Global Precipitation Climatology Project- (GPCP)
- ▶ Global Water Partnership -(GWP)
- ▶ Geostationary Operational Environmental Satellite -(GOES)
- ▶ GOES Precipitation Index -(GPI)
- ▶ Índice de Agua No Contabilizada -(IANC)
- ▶ Índice de precios al consumidor (IPC)
- ▶ Instituto Colombiano de Geología y Minería -(INGEOMINAS)
- ▶ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -(IDEAM)
- ▶ National Center for Atmospheric Research -(NCAR)
- ▶ National Centers for Environmental Prediction -(NCEP)
- ▶ North America Regional Reanalysis -(NARR)
- ▶ OLR Precipitation Index -(OPI)
- ▶ Organización Mundial de la Salud -(OMS)
- ▶ Planes de manejo ambiental de acuíferos (PMAA)
- ▶ Planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas -(POMCA)
- ▶ Planes de ordenamiento territorial -(POT)
- ▶ Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks (PERSIANN)
- ▶ Registro de usuarios del recurso hídrico -(RURH)
- ▶ Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico -(RAS)
- ▶ Retrospective Analysis for South America (RASA)
- ▶ Servicio Geológico Colombiano -(SGC)
- ▶ Sistema Nacional Ambiental -(SINA)
- ▶ Sistema Único de Información de Servicios Públicos (SUI)
- ▶ Sistemas de información geográfica (SIG)
- ▶ Sólidos disueltos totales (SDT9)
- ▶ Sondeos eléctricos verticales (SEV)
- ▶ Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)
- ▶ United State Geological Survey- USGS
- ▶ Universidad de Antioquia – (UDEA)
- ▶ Universidad Nacional de Colombia- (UN)

Bibliografía

- ▶ AMAYA RUIZ, G., 2009-II, Estudio de Uso Combinado de Fuentes de Agua Superficial y Subterránea para el Suministro de Agua Potable para el Municipio de Turbo, Antioquia. Trabajo de Grado Maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos, Directora: Maria Victoria Vélez Otálvaro, Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín
- ▶ ANDERSON y WOESSNER. 1992. Applied Groundwater Modeling. Academic Press. Inc. 1992
- ▶ ARDILA, L., 2012. Informe de la orden de Prestación de Servicios 438 DE 2012 de IDEAM, cuyo objeto fue: “Prestar los servicios para compilar y analizar la información sobre la normatividad nacional relacionada con las aguas subterráneas y los instrumentos de gestión existentes” Bogotá, 2012.
- ▶ BALEK, J. 1988. Groundwater recharge concepts. En: Estimation of Natural Groundwater Recharge. Boston: Ed. Reidel, NATO ASI Series, 1988. p. 3–9.
- ▶ BANCO MUNDIAL, 2007. Protección de la Calidad del Agua Subterránea guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales Guía Técnica parte B Propuestas Metodológicas para la Protección del Agua Subterránea, Stephen Foster, Ricardo Hirata, Daniel Gomes, Monica D’Elia, Marta Paris. Groundwater Management Advisory Team (GW•MATE) en colaboración con Global Water Partnership co-auspiciado por WHO–PAHO–CEPIS y UNESCO–ROSLAC–PHI. BANCO MUNDIAL. Washington, D.C.
- ▶ BANCO MUNDIAL, 2002-2006. Derechos de Extracción de Agua Subterránea de la teoría a la práctica. Nota No. 5, Serie de Notas Informativas Gestión Sustentable de Aguas Subterráneas, Conceptos y Herramientas. Grupo Base del GW•MATE: Héctor Garduño, Stephen Foster, Charles Dumars, Karin Kemper Albert Tuinhof y Marcella Nanni. Washington D.C., EEUU.
- ▶ BANCO MUNDIAL, 2002-2006. Requerimientos de Monitoreo del Agua Subterránea para manejar la respuesta de los acuíferos y las amenazas a la calidad del agua. Serie Informativa No. 9. Serie de Notas Informativas: Gestión Sustentable de Aguas Subterráneas, Conceptos y Herramientas. Grupo Base del GW•MATE: Albert Tuinhof, Stephen Foster, Karin Kemper, Héctor Garduño Marcella Nanni. Washington D.C., EEUU.
- ▶ BANCO MUNDIAL, 2002-2006. Amenazas Naturales a la Calidad del Agua Subterránea. Notas Informativas Nota 14. Serie de Notas Informativas: Gestión Sustentable de Aguas Subterráneas, Conceptos y Herramientas. Grupo Base del GW•MATE: Stephen Foster, Karin Kemper Albert Tuinhof Phoebe Koundouri Marcella Nanni Héctor Garduño.
- ▶ BASTIDAS, M. & COLABORADORES, 2009. El diálogo de saberes como posición humana frente otro: referente ontológico y pedagógico en la educación para la salud, Medellín: Revista: Investigación y Educación en Enfermería, volumen 27.
- ▶ BERGER, A., 1996. The geoinicator concept and its application: an introduction. En Geoindicators, Assessing rapid environmental changes in earth systems. 1-14
- ▶ BLARASIN, M., A. CABRERA y J. FELIZZIA. 2002. Geoindicadores y problemática ambiental urbana relacionada a cambios de niveles y calidad de aguas subterráneas. Argentina.
- ▶ BRADBURY, K. R., W. DRIPPS, C. HANKLEY, M. P. ANDERSON, AND K. W. POTTER. 2000. Refinement of Two Methods for Estimation of Groundwater Recharge Rates, Final project report to the Wisconsin Department of Natural Resources, 84 pp.
- ▶ BREDEHOEFT, J. 2005. The conceptualization model problem—surprise. Hydrogeol J (2005) 13:37–46.
- ▶ COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA DE MÉXICO - CONAGUA, 2007. Guía de Identificación de Actores Clave. Serie: Planeación Hidráulica en México, Componente: Proyectos Emblemáticos. Gobierno Federal, Estado Federal de México.
- ▶ COOPER, H., j. d. BREDEACHEF AND PAPADOPULOS. 1967. Response of finite diameter well to an instantáneos charge of water. Water Resourses and Research. Vol 3. N 1. Tp 263 – 269.
- ▶ CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA – CAR. Plan de manejo ambiental de agua subterránea en la Sabana de Bogotá y Zona Crítica. Bogotá D.C. Noviembre de 2008.
- ▶ CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE LA GUAJIRA – CORPOGUAJIRA: FORMULACIÓN DEL PLAN DE MANEJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DE MAICAO 2007 – 2016. Presentación CURSO TALLER GESTIÓN DE ACUÍFEROS COSTEROS. Santiago de Tolú, 20 al 24 de noviembre de 2006.
- ▶ CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE RISARALDA – CARDER. PLAN DE MANEJO INTEGRADO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN PEREIRA. Abril de 2007
- ▶ CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE RISARALDA – CARDER Y UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – POSGRADO EN GEOFÍSICA – SEDE BOGOTÁ, 2007 Modelo Geológico Geofísico de un sector de Cerritos – Pereira - Risaralda.
- ▶ CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE SUCRE – CARSUCRE. PROYECTO DE PROTECCIÓN INTEGRAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS - “PPIAS”. ACUÍFERO MORROA SECTOR SINCELEJO-COROZAL-MORROA. SINCELEJO, 2005.
- ▶ CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA – CVC. Plan de Manejo para la Protección de las Aguas Subterráneas en el Departamento del Valle Del Cauca.

- ▶ CORPORACIÓN PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE DEL ARCHIPIÉLAGO DE SAN ANDRÉS, PROVIDENCIA Y SANTA CATALINA – CORALINA. Plan de Manejo de las Aguas Subterráneas de la Isla de San Andrés, 2000 – 2009.
- ▶ CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA – CAR. Acuerdo No. 31 del 19 de septiembre de 2005.
- ▶ CUSTODIO, E. y LLAMAS M.R., 1976. Hidrología Subterránea. Tomo I y II. Editorial Omega. Barcelona, 2630 p.
- ▶ CUSTODIO, E. 1997. Evaluación de la recarga por la lluvia mediante métodos ambientales químicos, isotópicos y térmicos. En: La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. Textos Del Seminario Celebrado En Las Palmas De Gran Canaria. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid. 1997. p. 83–108.
- ▶ DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA – DANE, 2008- Manual de Indicadores, Bogotá, D. C.
- ▶ DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN – DNP, 2002. Banco de Programas y Proyectos de Inversión Nacional - BPIN -Dirección de Inversiones y Finanzas Públicas -DIFP MARCO TEÓRICO DEL BANCO DE INDICADORES SECTORIALES Bogotá, D.C., Noviembre 2002
- ▶ DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. Bases para Plan Nacional de Desarrollo 2010 – 2014.
- ▶ DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. Plan Nacional de Desarrollo 2006 – 2010. Prosperidad para todos: más empleo, menos pobreza y más seguridad. Bogotá D.C.
- ▶ DE VRIES, J. y SIMMERS, I. 2002. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. En: Hydrogeology Journal, No. 10: (2002). p. 5-17.
- ▶ FOSTER, S. KEMPER K., TUINHOF A., KOUNDOURI P., NANNI M., y GARDUÑO, H. 2002 - 2005. Amenazas Naturales a la Calidad del Agua Subterránea. Evitar problemas y formular estrategias de mitigación. Serie de Notas Informativas Nota 14 Programa asociado de la GWP BANCO MUNDIAL. Gestión Sustentable del Agua Subterránea Conceptos y Herramientas.
- ▶ FREIRE, P., 1970. Pedagogía del Oprimido, México: siglo XXI editores Argentina, S.A.
- ▶ GAVIRIA S., Jorge I. 2010. Desarrollo y aplicación de una metodología para evaluar el riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas en un acuífero libre. Tesis De Maestría. Universidad de Antioquia,
- ▶ GAVIRIA, J. Y BETANCUR T, 2005. Una caracterización de carga contaminante a los acuíferos libres del Bajo Cauca Antioqueño. En: Gestión y Ambiente. Medellín, Colombia. Diciembre, Universidad Nacional de Colombia. 2005. Vol 8. No. 2., p 85-102
- ▶ HERRERA, H. M. 2010. Presentación 2010: Manejo de las aguas subterráneas en la jurisdicción de CARSUCRE. SEMINARIO INTERNACIONAL ACUIFERURAL Métodos de evaluación de la vulnerabilidad y del riesgo de Contaminación del agua subterránea. Medellín Diciembre 16 y 17 de 2010.
- ▶ HIRATA, R. & REBOUÇAS, A. 1999. La protección de los recursos hídricos subterráneos: una visión integrada, basada en perímetros de protección de pozos y vulnerabilidad de acuíferos. Boletín Geológico Minero. Vol. 110(4):423-236
- ▶ HURTADO, M., A. 2009. Estimación de los campos mensuales históricos de precipitación en el territorio colombiano. Tesis de Maestría, Maestría en Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- ▶ INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES DE COLOMBIA – IDEAM. 2010. Estudio Nacional del Agua. Bogotá D.C.
- ▶ INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES DE COLOMBIA – IDEAM. 2007. Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento del Agua. Bogotá D.C.
- ▶ INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES DE COLOMBIA – IDEAM, 2004. Guía para el Monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas. Bogotá D.C.
- ▶ INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA. INGEOMINAS, 1983. Mapa Hidrogeológico General de Colombia.
- ▶ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN – ICONTEC, 1996a. Norma técnica Colombiana GTC30. Gestión ambiental. Suelos. Guía para el monitoreo de aguas subterráneas. ICONTEC y Ministerio de Desarrollo Económico.
- ▶ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN – ICONTEC, 1996b. Norma técnica colombiana NTC 3948. 1996. Gestión Ambiental. Suelo. Especificaciones técnicas para la construcción de un pozo de monitoreo para aguas subterráneas.
- ▶ INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INFORMACIÓN GEOCIÉNTIFICA MINERO AMBIENTAL Y NUCLEAR INGEOMINAS, 2002-2004, Atlas de Aguas Subterráneas de Colombia Subdirección Inventario de Recursos del Subsuelo, Bogotá D.C.
- ▶ INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES DE COLOMBIA – IDEAM, 2013. Lineamientos Conceptuales y Metodológicos para la Evaluación Regional del Agua – ERA. Bogotá D.C., 276 p.
- ▶ JACOB, C. E., 1947. Drawdown Test to Determine Effective Radius of Artesian Wells. Trans. Soc. Civil Eng., v. 72, No. 2321.1047 p.
- ▶ KONIKOW, L. Y• KENDY, E. 2005. Groundwater depletion: A global problem. Hydrogeol J (2005) 13:317–320.
- ▶ LEMUS. 2010. Presentación: análisis más reciente del efecto de los fenómenos ENSO en el comportamiento climático en Colombia. Subdirección de Meteorología. IDEAM.

- ▶ LERNER, D.N.; ISSAR, A.S.; SIMMERS, I. 1990. Groundwater recharge. A guide to understanding the natural recharge. Hannover: Ed. R. van Acken GmbH. 345p.
- ▶ MARSILY, G. 1986. Quantitative Hydrogeology: ground water hydrology for engineers. San Diego: Academia Press. 440 p.
- ▶ MEINZER, O. E., 1923. The Occurrence Of Ground Water In The United States, With A Discussion Of Principles. USGS Water Supply Paper: 489, 321 p.
- ▶ MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL - MAVDT. 2010 (a). Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Bogotá, D.C.: Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010. 124 p. ISBN: 978-958-8491-35-6.
- ▶ MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, MADS 2010 (b). Guía Metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuíferos. Informe final del contrato de consultoría individual, No. 198 DE 2010 MADS - BIRF, María Victoria Vélez Otálvaro. Bogotá D.C.
- ▶ MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, 2010 (c). Propuesta Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca de los Acuíferos a la Contaminación, Informe final contrato de consultoría Contrato No. 1021, Ingeniera María Consuelo Vargas Quintero. Bogotá D. C.
- ▶ MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, 2010 (d). Dirección de Licencias, Permisos y Trámites Ambientales. Metodología General para la presentación de Estudios Ambientales.
- ▶ MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL - MAVDT, INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES DE COLOMBIA - IDEAM Y INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INFORMACIÓN GEOCIÉNTIFICA, MINEROAMBIENTAL Y NUCLEAR – INGEOMINAS, CORALINA y CVC, 2002. Formulación de proyectos de protección integrada de aguas subterráneas – Guía Metodológica.
- ▶ MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, 2009. Grupo de Recurso Hídrico. TALLER: “MANEJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS” Bogotá D.C., 21 de mayo de 2009.
- ▶ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, 2013. Programa Nacional de Cultura del Agua. Documento en edición. Bogotá. D.C.
- ▶ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, 2013(b). Guía de Modelación del Recurso Hídrico para Aguas Subterráneas. Documento en edición. Bogotá D.C.
- ▶ MINISTERIO AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE – CORPOGUAJIRA – UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA. Plan de Manejo Ambiental de Acuífero PMAA – Cuenca del Río Ranchería. 2013.
- ▶ MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO, 2013. Reporte vía correo electrónico, sobre los municipios que dependen del agua subterránea para su abastecimiento.
- ▶ MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO, 2010. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS, TÍTULO B, Sistemas de Acueducto. Segunda Edición. Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico (Ed.)-Universidad de Los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental – Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados – CIACUA- Bogotá D.C. 480 p. ISBN: 978-958-8491-51-6
- ▶ MONTROYA, D. 2010. Modelo Conceptual y Numérico del sistema hidrológico Ciénaga de Colombia. Tesis Maestría. Universidad de Antioquia.
- ▶ NACIONES UNIDAS – COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA (CEPAL), 2002. Experiencias y Metodología de la Investigación Participativa, serie políticas sociales, publicación de las Naciones Unidas, LC/L.1715-P, ISBN: 92-1-322005-7, ISSN: 1564-4162. Impreso en Naciones Unidas, Santiago de Chile
- ▶ NELSON, R. 2010. Tell the Wells run dry?.Controlling groundwater depletion in California, USA and Victoria, Australia.Stanford Law School.Stanford University. Tesis de Maestría.
- ▶ ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL (OMM) - Guías de prácticas Hidrometeorológicas. OMM N° 168. Volumen 1 – 1984.
- ▶ OVERMEEREN, R. 1987. Seminario sobre aplicaciones de los métodos geofísicos en trabajos de ingeniería. Universidad de los Andes. Bogotá.
- ▶ PAEZ, G. 2008. Los indicadores ambientales del agua subterránea en el Valle del Cauca -Colombia.
- ▶ PIÑEROS A., HINCAPIÉ, G., 2009 Sección del Capítulo 1 del informe de Recopilación de información hidrogeológica y temática relacionada, existente y disponible para alimentar el estado de las aguas subterráneas de 15 áreas seleccionadas en Colombia y avances en la consolidación de instrumentos para el inventario de puntos de agua, realizado para el IDEAM.
- ▶ QUINTERO, O. - CVC. 2000. Proyecto control de la contaminación de las aguas subterráneas en el departamento del Valle. Plan de manejo de las Aguas subterráneas. Análisis de autores.
- ▶ 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. Textos del seminario celebrado en las palmas de gran Canaria. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid. 1997. p. 153-182.
- ▶ SCANLON, B.R.; HEALY, P.G.; COOK. 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. En: Hydrogeology Journal, No. 10: (2002). p. 18-39.
 - ▶ SISTEMA DE INFORMACIÓN AMBIENTAL DE COLOMBIA - SIAC Primera generación de indicadores de la línea base ambiental de la información ambiental de Colombia. 2002.
 - ▶ SIMMERS, I. 1990. Aridity, groundwater recharge and water resources management. En: Groundwater recharge. A guide to understanding the natural recharge. Hannover: Ed. R. van Acken GmbH, 1990. p. 1-20.
 - ▶ THEIS, C. V. 1935. The Relation Between the Lowering of the Piezometric Surface and the Rate Duration of Discharge of Well Using Ground-water Storage. Trans. Am. Geophysical Union, V. 16.519-524 p.
 - ▶ TOTH, J. 1963. A theoretical analysis of groundwater flow in a small drainage basin. Journal of Geophysical Resources, vol. 68(16), pp. 4795-4812.
 - ▶ UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION- UNESCO UNESCO/WHO, 1978 Water Quality Surveys. A Guide for the Collection and Interpretation of Water Quality Data. Studies and Reports in Hydrology, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris, 350 pp.
 - ▶ UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION- UNESCO. 2007. Groundwater Resources Sustainability Indicators. Groundwater Indicator Group: UNESCO, IAEA, IAH, Editors Vrba J. and Lipponen A. IHP/2007/GW-14
 - ▶ UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – UNAL. 2008. Plan de Ordenación y Manejo de la cuenca del río Aburrá – POMCA.
 - ▶ UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – UNAL, 2010. Modelación del acuífero San Andrés Islas bajo escenarios de Cambio Climático y Usos del recurso, Proyecto INAP-Colombia.
 - ▶ UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – UNAL, 2009. Sede Medellín. Geología, Geofísica, Hidrogeoquímica e Isótopos, como herramientas para definir un modelo conceptual hidrogeológico, caso de aplicación: acuífero costero del municipio de Turbo.
 - ▶ UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA. DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DEL TERRENO. 2001. Cálculo de los balances químicos en análisis de agua y su representación gráfica
 - ▶ UNITED STATE GEOLOGICAL SURVEY- USGS. 2003. Ground-Water Depletion Across the Nation. USGS Fact Sheet-103-03. November 2003.
 - ▶ VAN OVERMEEREN, R., 1987. Aplicación de los Métodos Geodésicos en Trabajos de Ingeniería. Universidad de los Andes. Bogotá.
 - ▶ VARGAS, O. 2004. Monitoreo de aguas subterráneas. Versión 13 de julio de 2004.
 - ▶ VÉLEZ M., VELILLA. J., RESTREPO, C., CORREO P., RHENALS L. 2008. Contaminación acuíferos. Universidad Nacional de Colombia.
 - ▶ VÉLEZ M. V., 1999. Hidráulica de Aguas Subterráneas, 2ª edición. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 1999.
 - ▶ VÉLEZ, O, M.V.; SALAZAR V. JF; BOTERO, V. 2005. Estimación de la recarga en una región Colombiana mediante un modelo iterativo. Ingeniería Hidráulica en México. V 20, n° 2, 2005.
 - ▶ VILLEGAS, P. 2010. Corpouraba. Manejo acuífero del golfo de Urabá corporación para el desarrollo sostenible del Urabá. Seminario Latinoamericano de Vulnerabilidad acuíferos rurales. Medellín, Diciembre 16 y 17.
 - ▶ VRBA, J. 2000. The Role of Groundwater Quality Monitoring in the Strategy of Groundwater Protection. Proceedings of the XXX IAH Congress. Balkema/Rotterdam.
 - ▶ WILHDM F. STRUCKMEIER A, and JEAN MARGAT., 1995. Hydrogeological Maps: A Guide And A Standard Legend / International Association of Hydrogeologists. - Hannover: Heise, 1995. (International contributions to hydrogeology; Vol. 17) ISBN 3-922705-98-7. 177p.
 - ▶ Vrba, Jaroslav; Lipponen, Annukka. 2007. Groundwater resources sustainability indicators. Series: I HP-VI series on groundwater Series (vol/issues):14. UNESCO/IAEA/IAH. 123 p.
 - ▶ WORLD BANK, 1993. World Bank Policy Paper, World Bank, Washington, DC.

Glosario

- ▶ **Abatimiento:** Diferencia entre el nivel estático y el nivel dinámico o de bombeo, en un pozo de explotación de aguas subterráneas.
- ▶ **Acuífero:** Estrato o formación geológica permeable que permite el almacenamiento y la circulación del agua subterránea por sus poros o grietas, bajo la acción de la aceleración de la gravedad o de diferencias de presión.
- ▶ **Acuíferos libres:** También llamados no confinados o freáticos. En ellos existe una superficie libre y real del agua, que está en contacto con el aire y a la presión atmosférica.
- ▶ **Acuíferos confinados:** También llamados cautivos, a presión o en carga. El agua está sometida a una presión superior a la atmosférica y ocupa totalmente los poros o huecos de la formación geológica, saturándola totalmente.
- ▶ **Agua subterránea:** Aguas ocultas debajo de la superficie del suelo o del fondo marino que brotan o no, en forma natural.
- ▶ **Cabeza de pozo:** Parte superior de la tubería de revestimiento del pozo
- ▶ **Cabeza hidráulica:** Altura de la columna de agua en reposo que representa la energía que puede producir a una presión dada. Por lo general, se mide como una elevación de la superficie líquida, expresada en unidades de longitud, a la entrada de un tubo piezométrico.
- ▶ **Captación:** Obra destinada a obtener un cierto volumen de agua de una formación acuífera concreta, para satisfacer una determinada demanda
- ▶ **Capacidad específica:** Relación entre el caudal y el abatimiento de un pozo o aljibe.
- ▶ **Isopiezas:** Línea que une los puntos de igual nivel piezométrico.
- ▶ **Trazador isotópico:** Trazador natural del agua o artificialmente introducido que es un isótopo de uno de los elementos presentes en el agua.
- ▶ **Nivel freático:** El nivel freático define el límite de saturación del acuífero libre y coincide con la superficie piezométrica. Su posición no es fija sino que varía en función de las épocas secas o lluviosas.
- ▶ **Nivel estático:** Nivel del agua subterránea en reposo, cuando no está influenciado por bombeo u otras formas de extracción de agua subterránea.
- ▶ **Nivel dinámico:** Nivel del agua subterránea durante el bombeo del pozo.
- ▶ **Nivel piezométrico:** El nivel piezométrico es la altura que alcanza el agua sobre una horizontal de referencia, cuando está a la presión atmosférica. Corresponde al nivel freático en acuíferos libres, y a la altura que alcanza el agua cuando se perfora un acuífero confinado.
- ▶ **Permeabilidad:** Propiedad física relacionada con la facilidad de penetración del agua al suelo.
- ▶ **Piezómetro:** Pozo cuya rejilla está situada a una determinada profundidad del acuífero, que sirve para medir variables hidrogeológicas y químicas.
- ▶ **Prueba de bombeo:** Ensayo que consiste en bombear agua en un pozo con uno o más caudales previamente elegidos, durante el cual se miden regularmente los niveles piezométricos en el pozo de bombeo y en pozos de observación cercanos; los datos obtenidos se utilizan para determinar los parámetros del acuífero en las proximidades del pozo de bombeo.
- ▶ **Recarga:** Proceso natural o artificial, por medio del cual se aporta agua a un acuífero, por infiltración directa o inducción de agua.
- ▶ **Tabla de agua:** En los acuíferos libres corresponde al nivel freático.
- ▶ **Superficie piezométrica:** La superficie definida por puntos de igual nivel piezométrico
- ▶ **Zona saturada:** Parte de una formación acuífera en la que todos sus huecos están llenos de agua.

Leyes y Decretos


- ▶ Acuerdo el 042 de 2010. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca.
- ▶ Decreto – Ley 2811 de 1974. Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Presidencia de la república de Colombia.
- ▶ Decreto 1541 de 1978. Ministerio de agricultura. República de Colombia.
- ▶ Decreto 1594 de 1984. Ministerio de agricultura. República de Colombia.

- ▶ Ley 99 de 1993. Ministerio del Medio Ambiente. República de Colombia.
- ▶ Decreto 1277 de 1994. Ministerio del Medio Ambiente. República de Colombia.
- ▶ Decreto 1600 de 1994. Ministerio del Medio Ambiente. República de Colombia.
- ▶ Ley 388 de 1997. El Congreso de Colombia. República de Colombia.
- ▶ Ley 715 de 2001. Congreso de Colombia. República de Colombia.
- ▶ Decreto 1729 de 2002. Ministerio del Medio Ambiente. República de Colombia.
- ▶ Ley 768 de 2002. Congreso de Colombia. República de Colombia.
- ▶ Decreto 2570 del 2006. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. República de Colombia.
- ▶ Resolución 872 de 2006. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. República de Colombia.
- ▶ Decreto 1323 de 2007. Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. República de Colombia.
- ▶ Decreto 1575 de 2007. Ministerio de Protección Social. República de Colombia.
- ▶ Decreto 3930 de 2010. Presidencia de la república de Colombia.
- ▶ Decreto 3570 de 2011. Departamento Administrativo de la Función Pública. República de Colombia.
- ▶ Decreto 4131 de 2011. Ministerio de Minas y Energía. República de Colombia.
- ▶ Ley 1450 de 2011. Congreso de la República. República de Colombia.
- ▶ Decreto 1640 de 2012. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. República de Colombia.

Páginas Web

(consultadas para la elaboración de las dos versiones de la presente guía, años 2010 y 2014)

- ▶ <http://www.aguaysig.com/2011/01/los-diagramas-mas-usados-para-la.html>
- ▶ <http://poseidon.medellin.unal.edu.co/~hidrosig>
- ▶ <http://www.ideam.gov.co/ordenacióndecuencas/cajasdeherramientas>
- ▶ <http://unesdoc.unesco.org/images/0015/001584/158459eo.pdf>
- ▶ http://www.barryeatonhealth.org/EH2/Water_Protection.htm
- ▶ http://larouchepub.com/spanish/other_articles/2010/NAWAPA_biospheric_development.html
- ▶ <http://www.lenntech.com/small-community-water-supplies.htm>
- ▶ <http://www.u-picardie.fr/beauchamp/cours.qge/du-7.htm>
- ▶ <http://www.vbco.org/planningeduc0020.asp>
- ▶ <http://www.cvc.gov.co>
- ▶ <http://unesdoc.unesco.org/images/0015/001584/158459eo.pdf>
- ▶ <http://www.ison21.es/tag/agua/page/2/>
- ▶ <http://www.fao.org/docrep/003/t0446s/t0446s07.htm>
- ▶ http://www.h2ogeo.upc.es/software/easy_quim/index.htm
- ▶ <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/IAC.pdf>
- ▶ http://larouchepub.com/spanish/other_articles/2010/NAWAPA_biospheric_development.html
- ▶ <http://www.sui.gov.co>
- ▶ <http://www.minambiente.gov.co>
- ▶ http://www.whycos.org/hwrp/guide/index_es.php



Guía Metodológica para la **Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos**



MinAmbiente
Ministerio de Ambiente y
Desarrollo Sostenible

**PROSPERIDAD
PARA TODOS**

Bogotá, D.C. 2014