



TRABAJO DE GRADO  
GUÍA CONCEPTUAL PARA LA EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN  
COLOMBIA.

WEIMAR LEONARDO ARÉVALO SASTOQUE  
ANDREA CAICEDO GAVIRIA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS  
BOGOTÁ D.C  
2022

TRABAJO DE GRADO  
GUÍA CONCEPTUAL PARA LA EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN  
COLOMBIA.

WEIMAR LEONARDO ARÉVALO SASTOQUE  
ANDREA CAICEDO GAVIRIA

Trabajo de grado presentado para optar al título de Especialista en Recursos  
Hídricos

Docente

Msc. LILIANA MARCELA ROJAS TRONCOSO

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS  
BOGOTÁ D.C  
2022



## Atribución-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0)

This is a human-readable summary of (and not a substitute for) the [license](#). [Advertencia](#).

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

**Adaptar** — remezclar, transformar y construir a partir del material

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia](#).

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. GENERALIDADES .....	7
2.1. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN Y TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	7
2.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	7
2.2.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN .....	9
2.2.2. VARIABLES DEL PROBLEMA .....	9
2.3. JUSTIFICACIÓN .....	11
3. OBJETIVOS.....	14
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	14
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
4. MARCOS DE REFERENCIA .....	15
4.1. GENERALIDADES .....	15
4.2. EXPLORACIÓN DE CAMPO .....	26
4.2.1. ESTUDIOS GEOFÍSICOS .....	28
4.3. METODOS DE EXTRACCIÓN .....	33
4.4. NORMATIVIDAD .....	35
4.5. DESCRIPCIÓN DEL TERRITORIO .....	39
4.6. ESTADO DEL ARTE:.....	42
4.7. MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL.....	43
5. METODOLOGÍA.....	44
5.1. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN .....	44
5.2. ENTIDADES AMBIENTALES CONSULTADAS.....	44
5.3. DESARROLLO DE DOCUMENTO FINAL .....	45
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	47
7. ANEXOS.....	48
8. BIBLIOGRAFÍA.....	49

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Ciclo Hidrológico.....	15
Ilustración 2. Acuíferos Semiconfinados .....	17
Ilustración 3. Acuífero poroso .....	18
Ilustración 4. Acuífero Fisurado .....	18
Ilustración 5. Acuífero Kárstico .....	19
Ilustración 6. Piezómetro .....	26
Ilustración 7. Datalogger .....	27
Ilustración 8. Medidor de nivel de agua sónico .....	27
Ilustración 9. Ensayo Lugeon.....	30
Ilustración 10. Ensayo de infiltración.....	31
Ilustración 11. Prueba de Bombeo.....	32
Ilustración 13. Aljibe.....	34
Ilustración 14. Pozo .....	35
Ilustración 15. Provincias hidrogeológicas delimitadas por el IDEAM.....	40
Ilustración 16. Mapa de inventario consolidado de puntos de agua subterránea ..	41

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Variables del Problema .....	10
Tabla 2. Normatividad ambiental .....	35

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Velocidad de Flujo, Ley de Darcy.....	20
Ecuación 2. Velocidad de Flujo con Delta h, Ley de Darcy.....	20
Ecuación 3. Caudal, Ley de Darcy.....	20
Ecuación 4. Transmisividad .....	23
Ecuación 5. Transmisividad en función del espesor saturado h .....	23
Ecuación 6. Coeficiente de Almacenamiento.....	24

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto se fundamenta en la necesidad de contar con elementos que permitan una adecuada gestión del recurso hídrico, específicamente el agua subterránea, tiene como finalidad la presentación de una propuesta de “guía conceptual para la extracción de aguas subterráneas” la cual corresponde a un documento donde se presenta de manera sistemática las generalidades de cómo lograr un proceso adecuado de captación de agua subterránea, teniendo como pilares los conceptos técnicos, buenas prácticas y los procesos de gestión del recurso hídrico en el país.

Partiendo de la base que el agua subterránea es utilizada de manera limitada para usos agrícolas, pecuarios, domésticos, industriales entre otros en Colombia, pero que no ha sido potencializado su importancia, así mismo, siendo conscientes que en muchas ocasiones estas captaciones no se encuentran legalizadas o no cuentan con el seguimiento adecuado que eviten daños ambientales, se propone dicha guía como un elemento de conceptualización que permita contextualizar a personas naturales, jurídicas, instituciones u otros grupos de interés en cómo llevar a cabo un correcto proceso de aprovechamiento de agua subterránea

La metodología implementada para la formulación de esta guía se basa en la recopilación de información secundaria que se compila, analiza y presenta de tal manera que se obtenga un paso a paso de cómo realizar un proceso adecuado de captación de agua subterránea. Las fuentes de información recopiladas son múltiples, que van desde normatividad colombiana que regula el uso y aprovechamiento del recurso hídrico, documentos y metodologías generadas por institutos de investigación del Sistema Nacional Ambiental, documentos técnicos que establecen y estandarizan conceptos, así como algunas guías procedimentales que presentan buenas prácticas que son requeridas para la extracción de agua subterránea.

La estructura de la guía está enmarcada en los elementos que componen un modelo hidrogeológico conceptual, el cual corresponde a un sistema establecido por la metodología de evaluación regional del agua – ERA del IDEAM y que busca una correcta caracterización hidrogeológica que promueve el adecuado aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo, es por esto que, como resultado de este proyecto, la guía presenta seis capítulos distribuidos así:

El primer capítulo de esta guía corresponde a la normatividad o uso del recurso, en este se describe paso a paso cual es la normatividad vigente que rige el agua subterránea, quiénes son las autoridades que regulan el recurso, cuáles son las instituciones que cuentan con la información acerca del agua subterránea y dependiendo del uso final del recurso, quienes son los llamados a solicitar un

permiso de concesión.

El segundo capítulo se enmarca en el modelo geológico – geofísico, en este instructivo el usuario podrá entender cuáles son las características requeridas para que una zona tenga potencial de aguas subterráneas, partiendo de información regional de geología para identificar sistemas acuíferos, cómo obtener esta información, cuáles son los conceptos utilizados en la identificación de unidades hidrogeológicas y comprender algunos elementos que permiten profundizar en información técnica para la identificación de acuíferos de los que se quiere obtener una captación, como lo es la prospección geoelectrica.

El tercer capítulo de esta guía comprende el procedimiento a seguir para entender un modelo hidrológico, el cual permite establecer la disponibilidad de agua en el sector, partiendo del inventario de puntos hidrogeológicos, así como de la importancia de las condiciones climáticas.

En el cuarto capítulo de esta guía se presenta el modelo hidráulico, en donde se explica como es el movimiento del agua subterránea, cuáles son los tipos de captación existentes y cuál de estos se acopla a la necesidad específica del usuario, así mismo, se expone cómo se obtienen los parámetros hidráulicos de cada captación y para qué sirve cada uno de ellos, teniendo en cuenta que estos ayudan a caracterizar el sistema acuífero.

En el quinto capítulo se presenta los elementos que son necesarios para entender un poco de la calidad del agua o modelo hidroquímico, que permite generar conciencia de por qué una captación debe estar en buenas condiciones, cuáles son las posibles afectaciones del agua subterránea y cuál es la importancia de conocer las condiciones químicas del recurso hídrico.

En la última sección de la guía se exponen elementos adicionales y de mayor especificidad que son requeridos para análisis hidrogeológicos puntuales, tales como se compila finalmente un modelo hidrogeológico conceptual, qué es un modelo hidrogeológico numérico, cuáles son algunos problemas específicos que requieren avanzados métodos de investigación, que aunque no son competencia de esta guía conceptual para la extracción de agua subterránea, permite a los lectores conocer de manera preliminar otros elementos que componen el análisis de los sistemas acuíferos.

El aporte final de este proyecto con la formulación de la presente guía, es brindar al usuario tales como personas naturales, jurídicas y/o entidades locales que requieran abastecerse de agua subterránea la posibilidad de conocer el espectro total de cómo se debe hacer un correcto aprovechamiento de agua subterránea que se encuentre enmarcado en la normatividad, en el tecnicismo, las buenas prácticas y una adecuada gestión que garantice la sostenibilidad de este recurso hídrico subterráneo.

## 2. GENERALIDADES

### 2.1. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN Y TIPO DE INVESTIGACIÓN

Gestión y tecnología para la sustentabilidad de las comunidades

### 2.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El crecimiento poblacional acelerado que se ha venido presentando en las últimas décadas y la falta de cuidado de los recursos naturales producto de las actividades antrópicas, han generado déficit hídrico en un importante porcentaje de los asentamientos humanos. De acuerdo con el artículo de distribución de agua en el planeta<sup>1</sup> se identifica que el agua dulce disponible en el mundo es de tan sólo el 2.5%. Del total de agua dulce disponible de acuerdo con el Manual de Agua Subterránea de Uruguay, “el 68.7% se encuentra en forma de hielo y nieve permanente, por lo que no está disponible directamente, el 29.9% corresponde a las aguas subterráneas, y sólo el 0.26% del agua dulce se encuentra en lagos, ríos y arroyos”<sup>2</sup>. Estos porcentajes evidencian como las fuentes alternativas de suministro de agua, pueden ofrecer una solución viable a los problemas de escasez del recurso hídricos.

De acuerdo con el estudio nacional del agua<sup>3</sup> el volumen total de aguas subterráneas en el país es del orden de 5,848 km<sup>3</sup>, lo cual indica que en Colombia el 74.5% del territorio nacional se encuentra conformado por provincias hidrogeológicas, de las cuales tan solo el 25.5% corresponden a rocas ígneas, metamórficas o por ambientes con posibilidades desconocidas, limitadas o restringidas; lo cual indica la gran riqueza del recurso hídrico subterráneo que posee el país, el cual no ha sido objeto de una evaluación formal.

Los datos que se tienen de aguas subterráneas<sup>4</sup> corresponde al consolidado por sectores económicos de una forma general, con base en la información reportada por las diferentes corporaciones, sin embargo, esta no cuenta con un rigor de registros administrativos en la mayoría de los casos, con lo cual se hace necesario seguir adelantado avances para los próximos estudios nacionales del agua.

Los usos de agua subterránea en Colombia corresponden a sectores domésticos, agrícola, industrial, pecuario, servicios y otros. De acuerdo el estudio nacional del

---

<sup>1</sup> JUNTA MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DE MAZATLÁN. Distribución de Agua en el Planeta. Sitio Web.

<sup>2</sup> MINISTERIO DE GANADERÍA AGRICULTURA Y PESCA, Manual de Agua Subterránea. Montevideo, Uruguay, 2012.

<sup>3</sup> INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Capítulo 4. Oferta y Uso de Agua Subterránea en Colombia, Reservas de agua subterránea en Colombia.

<sup>4</sup> Ibid

agua se puede observar que el sector que presenta un mayor uso de agua subterránea es el agrícola con un 75% del total de aguas subterráneas, en segundo lugar se encuentra el sector doméstico con tan solo un 8% y finalmente se encuentra un uso industrial del 7%, lo cual indica que estos tres sectores contemplan un 90% del total de aguas subterráneas en Colombia; y exhibe el bajo uso de agua doméstica respecto al total de agua subterránea aprovechada en el país.

En Colombia, aún más se observa la necesidad del recurso del agua para el consumo humano, si bien el país cuenta con fuentes superficiales estas se encuentran cercanas a centros poblados que terminan realizando sus vertimientos sobre los cuerpos de agua generando una problemática de contaminación en estas fuentes, si evaluamos la calidad de agua a nivel nacional se presentan afectaciones a los cuerpos de agua superficiales por vertimientos de fuentes difusas y fuentes puntuales.

Las condiciones de calidad de agua se evalúan de acuerdo con sus características físicas, químicas y biológicas que ven modificadas sus condiciones naturales por los diferentes procesos antrópicos. Principalmente se generan cargas contaminantes, agroquímicos y vertimientos de diferentes metales producto de la minería. De acuerdo con el estudio nacional del agua “el sector industrial es el mayor aportante de carga orgánica neta que se vierte a las corrientes hídricas, estimando en el 51% en DBO, 62% en DQO, con respecto a la carga total sumando los tres sectores”<sup>5</sup> (doméstico, industrial, café).” En el sector doméstico el mayor aporte lo hacen los sólidos suspendidos totales con el 80%, nutrientes en PT 91% y NT 74%”<sup>6</sup>.

Otro factor importante que se presenta a nivel nacional corresponde al desabastecimiento, presentado en cabeceras municipales susceptibles al desabastecimiento en temporadas secas, de acuerdo con el estudio nacional del agua se realizó la evaluación para 391 municipios priorizados en 24 departamentos afectados; el cual concluyó con que “los departamentos de Santander, Cundinamarca, Boyacá, Tolima y Bolívar concentran la mayor cantidad de municipios susceptibles al desabastecimiento hídrico en temporada seca”<sup>7</sup>.

Según el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Colombia pasó de un 58% en 1985 a un 90% en 2018 lo que indica que aún hace falta una cobertura del 10% del territorio nacional especialmente las zonas rurales.

---

<sup>5</sup> MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, Estudio Nacional del agua. Colombia, 2018. Pág. 245.

<sup>6</sup> Ibid. Pág 245.

<sup>7</sup> Ibid Pág 309.

El departamento de la Guajira es el municipio No. 10 de afectación en desabastecimiento hídrico en temporada seca<sup>8</sup>, esto sumado a la dificultad de obtención de agua dulce en el territorio por sus características de localización, y los costos tan elevados que se presentan en el proceso de desalinización de agua de mar, convierten al departamento de la Guajira en un territorio olvidado y con graves problemas de abastecimiento de agua. De acuerdo con el ministerio de vivienda la Guajira presenta la cobertura rural más baja del país en cobertura de agua con tan solo un 4% de la población. Así mismo presenta la continuidad más baja con un promedio de solo 9 horas al día en zona urbana y solo 3 de 15 municipios tienen agua apta para consumo humano<sup>9</sup>.

Las diferentes problemáticas presentadas a lo largo del territorio nacional hacen necesario buscar alternativas que permitan atender la insuficiencia de agua potable en Colombia, de acuerdo con esto se exhibe la importancia de utilizar otras fuentes de abastecimiento que permitan atender a las poblaciones más vulnerables, para ello es trascendental generar una forma segura para conseguir este recurso; es por esto que se busca establecer una guía conceptual para la extracción de aguas subterráneas en Colombia, que sirva como marco de referencia en todo el territorio, en el que se indiquen las diferentes formas de obtener este recurso aprovechando las fuentes de agua subterránea.

### 2.2.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál sería una buena metodología para la extracción de aguas subterráneas en Colombia?

### 2.2.2. VARIABLES DEL PROBLEMA

Las variables son factores que pueden ser manipulados o medidos con el fin de determinar si existe un cambio en ellos, una vez realizado el proyecto de investigación, en la Tabla 1 se muestran las variables definidas:

---

<sup>8</sup> INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Capítulo 4. Oferta y Uso de Agua Subterránea en Colombia, Reservas de agua subterránea en Colombia.

<sup>9</sup> MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO DE COLOMBIA. Viceministerio de Agua y Saneamiento, Guajira Azul. Sitio Web.

Tabla 1. Variables del Problema

<b>Variable</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Descripción</b>
Precipitación	mm	Agregado de partículas acuosas líquidas o sólidas producto de la condensación con formas cristalizadas o amorfas, que caen de un grupo de nubes y alcanzan el suelo.
Recarga de Acuífero	-	Es un método de gestión hídrica por la cual se permite el ingreso de agua en los acuíferos subterráneos. Una vez almacenada puede ser extraída para diferentes usos
Capacidad de Campo	-	Se refiere a la cantidad relativamente constante de agua que contiene un suelo saturado después de 48 horas de drenaje.
Profundidad del Acuífero	m	Medida que indica la distancia entre el nivel de terreno respecto al nivel de agua del acuífero.
Caudal de Producción	m <sup>3</sup> /s	Máxima extracción de agua que un acuífero puede sostener sin causar una disminución inaceptable de la carga hidráulica en el acuífero.
Transmisividad	m <sup>3</sup> /día	Se denomina transmisividad al caudal de agua que proporciona una sección de ancho de unidad de frente acuífero, sometida a un gradiente del 100%

Variable	Unidad de medida	Descripción
Coeficiente de Almacenamiento	-	Es la cantidad de agua cedida por un prisma de acuífero de un metro cuadrado de sección y altura la del acuífero, cuando el nivel piezométrico baja un metro.
Permeabilidad o Conductividad Hidráulica	-	Capacidad del suelo de contener y transmitir el agua en un acuífero.

Fuente: Elaboración propia

### 2.3. JUSTIFICACIÓN

Colombia es un país que cuenta con abundancia en recursos hídricos donde podemos encontrar fuentes superficiales y fuentes subterráneas a lo largo de todo el territorio, sin embargo el crecimiento de población en las diferentes regiones, principalmente las ciudades capitales y municipios que se encuentran a las afueras de las mismas; han generado una mayor demanda de agua potable; así mismo han generado una mayor contaminación en los cuerpos de agua que no permiten el aprovechamiento del agua en las poblaciones que se ubican aguas abajo, o generan que los costos de tratamiento se incrementen para poder mejorar la calidad de agua.

De acuerdo con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS en 2017 el 60% del agua procedente de las llaves de hogares colombianos no está en condiciones óptimas de potabilización.

Sumado a lo anterior si se evalúa el avance de cobertura de los sistemas de acueducto a nivel nacional de acuerdo con datos del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS para el año 2015 el 28% de la población que hace parte de las zonas rurales del país enfrentan una situación crítica por la falta de acueducto, por lo que muchas personas deben acudir a fuentes de abastecimiento sin ningún tipo de calidad en el agua para consumo. El porcentaje anterior corresponde aproximadamente a unos 3.1 millones de colombianos, donde las poblaciones de Pacífico y Atlántico son las que presentan mayor carencia en el servicio.

A nivel nacional las poblaciones que presentan una problemática mayor en cuanto a cobertura, continuidad y calidad son las poblaciones rurales, el número de

habitantes de las zonas rurales en Colombia es aproximadamente 11.7 millones, si el 28% no cuenta con servicio de acueducto, y adicionalmente de acuerdo con un informe del Instituto Nacional de Salud – INS en 2015 en el cual se reveló que solo el 15.1% utilizan agua de buena calidad lo que aproximadamente son 0.9 millones de habitantes deja en evidencia el estado de los sistemas de acueducto en el país, ya que el 43.6% usa agua con bajas propiedades de calidad y el 23.3 % utiliza agua cruda.

Por otra parte, es importante resaltar que, sumado a la falta de cobertura y calidad de sistemas de acueductos, no todas las fuentes de agua superficiales que se utilizan para el abastecimiento de agua se explotan de la mejor manera o cuenta con los permisos por parte de las diferentes corporaciones, lo que genera un daño ambiental; ya que no se evalúa el impacto de la captación y no se contribuye a la prestación del servicio.

El uso de aguas subterráneas en Colombia es de gran importancia toda vez que con su aprovechamiento se puede brindar cobertura a sectores como el doméstico, agrícola, industrial, ganadero y pecuario entre otros. Sí del total de agua subterránea que se extrae en Colombia la mayor parte corresponde al uso agrícola con un 75% [3], vemos que se presenta una gran diferencia con el doméstico e industrial, al potenciar el uso doméstico de las aguas subterráneas se llegaría a atender mayor población dentro del territorio y de esta manera brindar continuidad en el servicio y agua de buena calidad, disminuyendo grandes trayectos que se pueden requerir al utilizar redes de acueducto desde una fuente de agua superficial.

En cuanto al uso industrial este corresponde a tan solo un 8% del total extraído en el país<sup>10</sup>, esto genera un reto para poder llegar a más industrias en el territorio, ya que el uso de aguas subterráneas en la industria puede disminuir los costos de producción de diferentes industrias que requieren un alto volumen de agua en el desarrollo de sus productos como es el caso de las embotelladoras de agua.

Adicionalmente si se evalúan los mapas de zonas hidrogeológicas de Colombia que se pueden encontrar en el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales – IDEAM se puede observar que gran parte del territorio presenta ambientes sedimentarios y vulcano clásticos con buenas posibilidades hidrogeológicas, principalmente en las regiones de Caguán, Vaupés, Amazonas, Catatumbo, Cesar, Choco, Guajira, Llanos Orientales,, Plegada de la Cordillera Oriental, Putumayo, San Andrés, Sinú, Tumaco, Urabá, Valle del Cauca, Valle de Magdalena, entre otros.

---

<sup>10</sup> INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Capítulo 4. Oferta y Uso de Agua Subterránea en Colombia, Reservas de agua subterránea en Colombia.

Por lo anterior observamos el gran potencial de aguas subterráneas en el país lo cual exhibe la necesidad de explotar las aguas subterráneas y buscar el desarrollo y aprovechamiento de esta práctica para que pueda llegar a todas las poblaciones a nivel nacional.

Para poder fomentar el uso de aguas subterráneas en el país se hace necesario generar una metodología que permita el aprovechamiento de acuíferos en Colombia identificando las diferentes formas que existen para su diseño y extracción. Ayudando así a dar solución a la falta de abastecimiento de agua potable y sistemas de acueducto en poblaciones apartadas.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1. OBJETIVO GENERAL

Establecer una metodología para la extracción y el aprovechamiento de aguas subterráneas en Colombia

#### 3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar los tipos de fuentes más comunes de aguas subterráneas en Colombia.
2. Establecer el estado del arte para la extracción de aguas subterráneas en Colombia teniendo en cuenta la normatividad vigente.
3. Establecer el diagrama de flujo de la metodología propuesta para el aprovechamiento de aguas subterráneas en Colombia.
4. Desarrollar el paso a paso de la guía conceptual con base en la teoría y fuentes consultadas.

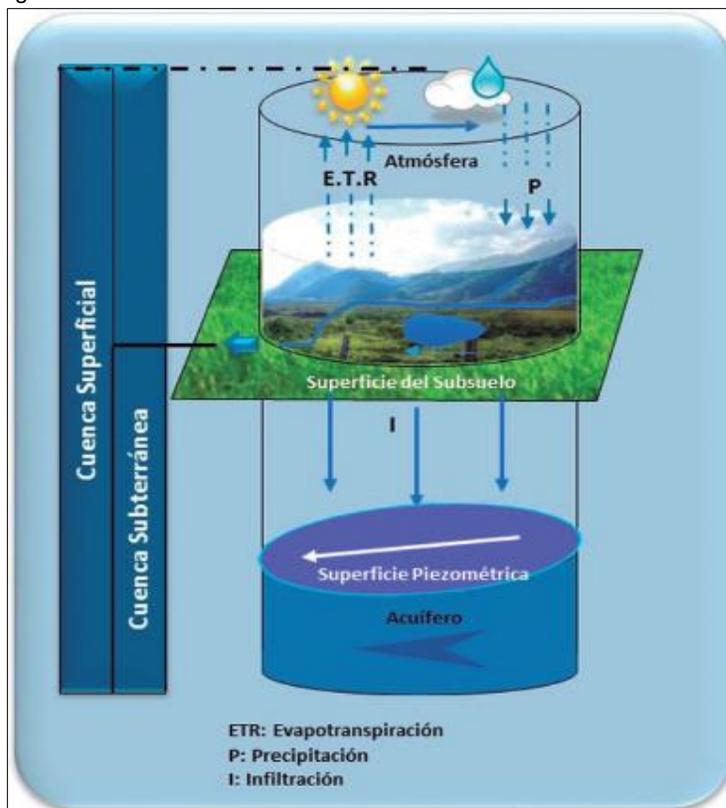
## 4. MARCOS DE REFERENCIA

### 4.1. GENERALIDADES

Para el desarrollo de la metodología es necesario abordar diferentes conceptos básicos de geología e hidrología que permiten el entendimiento de las diferentes variables que hacen parte de un balance hídrico y un modelo hidrogeológico conceptual. A continuación, se describen los conceptos y las variables más empleadas en el desarrollo de la presente metodología.

- **Ciclo Hidrológico:** Se define al ciclo hidrológico como el proceso por el cual el agua pasa de la superficie terrestre a la atmósfera en fase de vapor y retorna al suelo en forma líquida o sólida. El agua subterránea se encuentra dentro del ciclo hidrológico y hace parte de la cantidad de precipitación que logra infiltrarse por el suelo a través de los poros y grietas de las rocas y diferentes capas del suelo o de las diferentes fuentes superficiales como ríos, lagunas o lagos. La Ilustración 1 muestra gráficamente el proceso del ciclo hidrológico.

Ilustración 1. Ciclo Hidrológico



Fuente: Guía metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuíferos. MADs.

- **Acuífero:** Formación geológica que tiene la capacidad de almacenar agua en su interior y ceder parte de la misma debido a su suelo permeable. No todas las formaciones cuentan con la capacidad de almacenar y transmitir agua, encontrando formaciones que pueden almacenar, pero no transmitir agua en condiciones naturales y por lo tanto no es posible realizar la extracción, se denominan a este tipo de acuíferos como acuicludos, otras formaciones no cuentan con la capacidad de almacenar ni de transmitir agua subterránea, son impermeables y se denominan acuífugos. Por último, se encuentran los acuítratos que son formaciones semipermeables, que transmiten el agua de forma muy lenta dificultando su extracción mediante obras de captación, pero son importantes en la recarga de acuíferos subyacentes, debido a la posible filtración vertical o drenaje.

Los acuíferos se pueden clasificar de dos formas; de acuerdo con su estructura o del tipo de porosidad derivada de los materiales que conforman el acuífero<sup>11</sup>.

En función de la estructura del acuífero se tiene:

1. Acuíferos libres, no confinados o freáticos.
2. Acuíferos confinados, cautivos o a presión.
3. Acuíferos semiconfinados o semicautivos.

**1. Acuíferos libres, no confinados o freáticos:** Son acuíferos cuyo piso es impermeable y su techo está a presión atmosférica. La recarga de este tipo de acuífero es directa y se realiza por infiltración del agua de lluvia a través de la zona no saturada o por infiltración de ríos o lagos. Son los más afectados en caso de sequía, ya que el nivel freático oscila con los cambios climáticos. Pozos muy someros se ven afectados (se secan), cuando el nivel freático desciende hasta por debajo de la profundidad total del pozo.

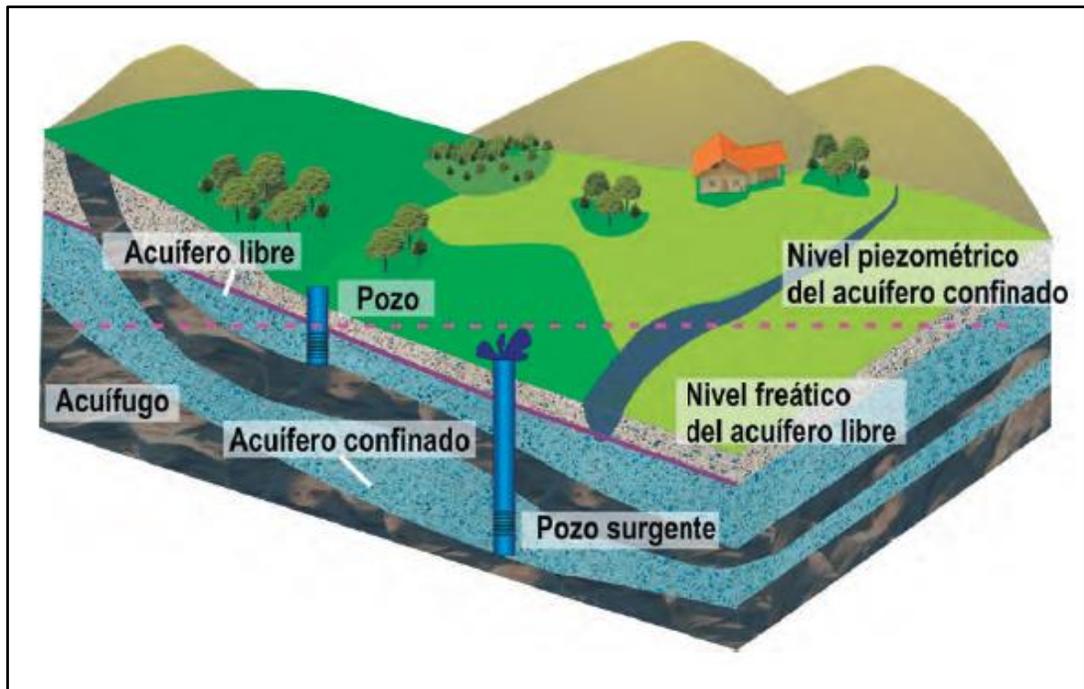
**2. Acuíferos confinados, cautivos o a presión:** Limitados en su parte superior por una formación de baja a muy baja permeabilidad. La presión hidrostática a nivel del techo del acuífero es superior a la atmosférica y la recarga es lateral. Cuando se realiza un pozo en este tipo de acuíferos, el agua contenida en ellos asciende rápidamente por su interior. Si el agua alcanza la superficie, al pozo se le llama surgente. Superficie potenciométrica se le denomina al nivel de agua virtual que se genera cuando se integran todos los niveles hidráulicos observados en los pozos del acuífero confinado.

---

<sup>11</sup> MINISTERIO DE GANADERÍA AGRICULTURA Y PESCA, Manual de Agua Subterránea. Montevideo, Uruguay, 2012.

**3. Acuíferos semiconfinados o semicautivos:** Son mucho más frecuentes en la naturaleza que los cautivos. En estos, el techo, el piso o ambos, están formados por capas de baja permeabilidad que si bien dificultan no impiden la circulación vertical del agua. Para que ello suceda, además de la permeabilidad deben existir diferencias de carga o potencial hidráulico entre el acuífero semiconfinado y otro superior o inferior. Los acuíferos semiconfinados se recargan y descargan a través de las unidades de baja permeabilidad denominadas semiconfinantes, filtrantes o acuitardos y se ilustran gráficamente a continuación:

Ilustración 2. Acuíferos Semiconfinados



Fuente: Tomado de Manual de Agua Subterránea. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Uruguay

En función del tipo de porosidad se clasifican:

1. Acuíferos de porosidad primaria, porosos o sedimentarios.
2. Acuíferos de porosidad secundaria, fisurados o fracturados.
3. Acuíferos por disolución, químicos o kársticos.

**1. Acuíferos de porosidad primaria o poroso:** Constituidos por formaciones geológicas sedimentarias. Los materiales suelen ser gravas y principalmente arenas, que varían su composición y tamaño en función de su origen geológico (fluvial, eólico, lacustre, glacial, etc). Estos materiales pueden estar sueltos o no consolidados (generalmente son formaciones recientes, de edad cuaternaria) o consolidado. En la Ilustración 3 se observa un ejemplo de acuífero poroso.

Ilustración 3. Acuífero poroso



Fuente: Tomado de Manual de Agua Subterránea. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Uruguay

**2. Acuíferos de porosidad secundaria o fisurado:** Formados por rocas “duras” de origen ígneo o metamórfico. La porosidad en estos acuíferos viene dada por la presencia de zonas de alteración, fracturas, fallas o diaclasas, única forma que tiene el agua de almacenarse y de circular, como se muestra en la Ilustración 4. Hay que tener en cuenta que para que el agua pueda circular, estas fracturas tienen que estar abiertas y comunicadas.

Ilustración 4. Acuífero Fisurado



Fuente: Tomado de Manual de Agua Subterránea. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Uruguay

**3. Acuíferos kársticos por disolución:** Compuestos por rocas de origen carbonático (calizas, margas, dolomías), donde la porosidad (huecos y cavernas) se desarrollan en forma secundaria por disolución del carbonato. El agua en estos acuíferos circula por entre los huecos con una velocidad mayor que en los acuíferos porosos o fracturados, como se observa en la Ilustración 5 a continuación.

Ilustración 5. Acuífero Kárstico



Fuente: Tomado de Manual de Agua Subterránea. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Uruguay.

- **Ley de Darcy:** La ley de Darcy establece la relación macroscópica fundamental, y a partir de ella se puede llegar a expresar el flujo en forma de ecuaciones diferenciales. Cuando se realiza una definición de carácter macroscópico se trata el medio como un continuo con propiedades medias bien definidas; estas leyes se basan en la consideración de tres parámetros fundamentales: La permeabilidad, la porosidad y el coeficiente de almacenamiento.

La ley de Darcy es también una “ley macroscópica que representa el comportamiento de un número elevado de poros, aunque no representa el comportamiento del agua dentro de cada poro y permite tratar el flujo subterráneo como un flujo no viscoso. Esta ley puede derivarse de las ecuaciones de Navier Stokes para fluidos viscosos si se tiene en cuenta la existencia del medio poroso y así mismo se le representa por sus valores medios”<sup>12</sup>.

<sup>12</sup> CUSTODIO, Emilio, LLAMAS, Manuel. Hidrología Subterránea. Barcelona, 1983. Tomo I. P. 449

La ecuación que describe la ley de Darcy se describe a continuación donde el  $\Delta h$  puede obtenerse en régimen laminar.

$$v = k \times i = -k \times \frac{dh}{ds}$$

Ecuación 1. Velocidad de Flujo, Ley de Darcy

Donde,

v: Velocidad de flujo

i: Gradiente hidráulico

k: Permeabilidad o conductividad hidráulica

La ley de Darcy se desarrolló con experimentos en cilindro rellenos de material poroso y ha sido constantemente confirmada por un número importante de investigadores.

En el desarrollo de la de los ensayos se tiene un cilindro vertical de sección constante A y longitud L, se hace circular agua en su interior con una diferencia de energía entre la entrada y la salida  $\Delta h$ , puede escribirse así:

$$v = k \times \frac{\Delta h}{L}$$

Ecuación 2. Velocidad de Flujo con Delta h, Ley de Darcy

Y el caudal que circula puede expresarse de la siguiente forma:

$$Q = v \times A = k \times A \times \frac{\Delta h}{L}$$

Ecuación 3. Caudal, Ley de Darcy

- **Conductividad Hidráulica:** Es la capacidad de un medio poroso para transmitir agua, esta depende de las características del medio, de la masa específica y viscosidad del agua, y corresponde a la constante de proporcionalidad de la ley de Darcy<sup>13</sup>.

De acuerdo con el artículo “Sobre la influencia de la distribución espacial del contenido de finos en la conductividad hidráulica de mezclas areno-arcillosas” editorial Universidad Nacional de Colombia “las mezclas de arena y arcilla son uno de los suelos más comunes en el diseño de algunas

---

<sup>13</sup> MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, Guía para el Uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA. Chile, 2012. P. 63.

estructuras geotécnicas, ya sea en un entorno de suelo natural o como material de relleno, en ambos casos la estimación de la conductividad hidráulica permite cuantificar los caudales de infiltración, fuerzas de infiltración, duración de la consolidación, entre otros”<sup>14</sup>. La literatura muestra que, para mezclas saturadas de arena y arcilla, la conductividad depende de las proporciones relativas entre los dos materiales, la densidad o porosidad general, la mineralogía o tipo de material y la interconexión entre poros.

- **Balance hídrico:** El balance hídrico se establece para un lugar y un período dados, por comparación entre los aportes y las pérdidas de agua en ese lugar y para ese período. En esta definición surgen como datos que se deberán analizar, las entradas y las salidas de agua.  
“El balance hídrico se fundamenta en la ecuación de continuidad con el principio que “Nada se crea ni se destruye” y se expresa de acuerdo con las siguientes variables”<sup>15</sup>:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} \pm \text{Variación de Almacenamiento}$$

La ecuación anterior se puede utilizar para una región o para una unidad como por ejemplo un acuífero en un tiempo cualquiera. En el escenario que el que los tiempos se tornen demasiado grandes se puede considerar que las variaciones en almacenamiento son despreciables lo que nos lleva a que el balance en entrada y salida serán iguales<sup>16</sup>.

- **Suelos**<sup>17</sup>: El suelo es un componente fundamental del ambiente, natural y finito, constituido por minerales, aire, agua, materia orgánica, macro y microorganismos que desempeñan procesos permanentes de tipo biótico y abiótico, cumpliendo funciones vitales para la sociedad y el planeta.  
Cubre la mayor parte de la superficie terrestre; su límite superior es el aire o el agua superficial; sus fronteras horizontales son las áreas donde el suelo cambia, a veces gradualmente, a aguas profundas, rocas o hielo; el límite inferior puede ser la roca dura o depósitos de materiales virtualmente desprovistos de animales, raíces u otras señales de actividad biológica y que no han sido afectados por los factores formadores del suelo (Soil Survey Staff, 1994).

---

<sup>14</sup> HURTADO, W. M, influencia de la distribución espacial del contenido de finos en la conductividad hidráulica de mezclas areno-arcillosas. Bogotá, 2020. P. 2.

<sup>15</sup> CUSTODIO, Emilio y LLAMAS, Manuel. Hidrología Subterránea. Barcelona, 1983. Tomo I. P. 449

<sup>16</sup> MINISTERIO DE AMBIENTE Y CONTROL DEL DESARROLLO SOSTENIBLE. Balance Hídrico. Sitio Web

<sup>17</sup> Definición tomada de SISTEMA DE INFORMACIÓN AMBIENTAL DE COLOMBIA. Sitio Web.

- **Precipitación<sup>18</sup>:** La precipitación es la caída de agua desde la atmósfera hacia la superficie terrestre. La precipitación forma parte del ciclo del agua que mantiene el equilibrio y sustento de todos los ecosistemas. La precipitación se genera por la condensación de agua, o sea, la acumulación de agua en la atmósfera creando nubes. El agua que se acumula en la atmósfera generalmente se encuentra en estado gaseoso. Cuando existe una cantidad considerable de agua gaseosa dentro de las nubes el agua pasa del estado gaseoso al líquido o al sólido.
- **Temperatura<sup>19</sup>:** Del latín temperatura, la temperatura es una magnitud física que refleja la cantidad de calor, ya sea de un cuerpo, de un objeto o del ambiente. Dicha magnitud está vinculada a la noción de frío (menor temperatura) y caliente (mayor temperatura). La temperatura está relacionada con la energía interior de los sistemas termodinámicos, de acuerdo al movimiento de sus partículas, y cuantifica la actividad de las moléculas de la materia: a mayor energía sensible, más temperatura.
- **Radiación solar:** La radiación solar es la energía emitida por el Sol, que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas. Esa energía es el motor que determina la dinámica de los procesos atmosféricos y el clima. La energía procedente del Sol es radiación electromagnética proporcionada por las reacciones del hidrogeno en el núcleo del Sol por fusión nuclear y emitida por la superficie solar<sup>20</sup>.
- **Evapotranspiración:** Es la suma de dos fenómenos que tiene lugar en la relación cultivo-suelo, la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo, la misma constituye la pérdida fundamental de agua, a partir de la cual se calcula la necesidad de agua de los cultivos<sup>21</sup>.
- **Gravedad:** Se denomina gravedad a la fuerza que ejerce la Tierra sobre todos los cuerpos, atrayéndolos hacia su centro. Es la gravedad la que hace que los objetos caigan al suelo y la que nos crea la sensación de peso. Asimismo, es la responsable de todos los movimientos que observamos en el universo.
- **Recarga de Acuífero:** Es un método de gestión hídrica por la cual se permite el ingreso de agua en los acuíferos subterráneos. Una vez almacenada puede ser extraída para diferentes usos (agrícolas, abastecimiento urbano e

---

<sup>18</sup> Definición tomada de SIGNIFICADOS. Sitio Web.

<sup>19</sup> Definición tomada de DEFINICIÓN. Sitio Web.

<sup>20</sup> Definición tomada de IDEAM. Sitio Web.

<sup>21</sup> Definición tomada de EcuRed. Sitio Web.

industrial, reducir la contaminación, entre otros). Las fuentes de los acuíferos pueden ser escorrentía superficial ríos, humedales entre otros.

- **Capacidad de Campo:** Se refiere a la cantidad relativamente constante de agua que contiene un suelo saturado después de 48 horas de drenaje. El drenaje ocurre por la trasmisión del agua a través de los poros mayores de 0.05 mm de diámetro; sin embargo, la capacidad de campo puede corresponder a poros que varían entre 0.03 y 1 mm de diámetro. El concepto de Capacidad de Campo se aplica únicamente a suelos bien estructurados donde el drenaje del exceso de agua es relativamente rápido; si el drenaje ocurre en suelos pobremente estructurados, por lo general continuará durante varias semanas y este tipo de suelos de estructura tan pobre raramente tiene una Capacidad de Campo claramente definida. La Capacidad de Campo se determina mejor en el campo saturando el suelo y midiendo su contenido de agua después de 48 horas de drenaje. El suelo a capacidad de campo se siente muy húmedo en contacto con las manos<sup>22</sup>.
- **Transmisividad:** “Se conoce como transmisividad a la cantidad estimada de agua que puede ser transmitida horizontalmente en un acuífero confinado de espesor b, bajo un gradiente hidráulico unitario”.

Se define como:

$$T = b \times K$$

Ecuación 4. Transmisividad

Donde,

b: Espesor saturado

K: Conductividad hidráulica

En el escenario que el acuífero tenga presencia de múltiples estratos, la transmisividad total será la suma de las transmisividades de cada estrato.

Para un acuífero libre la transmisividad se expresa en función del espesor saturado h como:

$$T = h \times K$$

Ecuación 5. Transmisividad en función del espesor saturado h

- **Evaporación:** La evaporación es el proceso por el cual las moléculas en

---

<sup>22</sup> Tomado de FAO. Glosario de términos sobre humedad del suelo. Sitio Web.

estado líquido (por ejemplo, el agua) se hacen gaseosas espontáneamente<sup>23</sup>.

- **Coeficiente de Almacenamiento:** Parámetro que indica el agua que podemos obtener de acuíferos confinados y semiconfinados

$$S = \frac{\text{Volumen de agua liberado}}{\text{Volumen total que ha bajado la superficie piezométrica}}$$

Ecuación 6. Coeficiente de Almacenamiento

Es adimensional. Se refiere al volumen que es capaz de liberar el acuífero al descender en una unidad el nivel piezométrico (o la presión). Se define como el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical del acuífero, de sección igual a la unidad y altura la del espesor saturado, si se produce un descenso unidad del nivel piezométrico. Toma valores diferentes según sea el acuífero libre o cautivo. En un acuífero libre el valor del coeficiente de almacenamiento coincide con el valor de porosidad eficaz. En un acuífero cautivo, sin embargo, este volumen de agua que causa un descenso de una unidad en el nivel piezométrico, coincide con la suma del agua a descomprimirse y el agua que cede el terreno al compactarse el armazón por tener que soportar en mayor parte el peso del terreno suprayacente.

En un acuífero libre:  $S=0'05 - 0'03$

En acuíferos confinados:  $S= 10^{-3} - 10^{-5}$ . (ORDOÑEZ, Juan)

- **Presión Atmosférica:** La presión atmosférica es la fuerza que el peso de la columna de atmósfera por encima del punto de medición ejerce por unidad de área. La unidad de medición en el sistema métrico decimal es el hecto Pascal (hPa) que corresponde a una fuerza de 100 Newton sobre un metro cuadrado de superficie. La variación de la presión con la altura es mucho mayor que la variación horizontal, de modo que para hacer comparables mediciones en lugares diferentes, se deben referir a un nivel común (usualmente el nivel del mar)<sup>24</sup>.

La presión atmosférica, también conocida como barométrica, es la que provoca el peso de la masa de aire que está actuando sobre la tierra.

Este valor será mayor o menor, en función de la altitud que se encuentre el proyecto o zona de estudio, con referencia al punto más bajo considerado, que suele ser el nivel del mar, pero también se ve influenciado por algunos efectos atmosféricos producidos por la circulación de las corrientes de aire

<sup>23</sup> Tomado de Ciclo Hidrológico. Sitio Web.

<sup>24</sup> Tomado de Cambridge Monitor. Sitio Web.

cálido o frío.

De forma teórica, se considera que el valor máximo de la presión atmosférica se consigue a nivel del mar, aunque en algunos puntos de la tierra existen zonas por debajo de dicho nivel. Su valor en este punto corresponde con los 1013 mbar o 760 mm Hg. También se usa comúnmente el valor de 1 atmósfera (atm) como unidad de referencia, pero no está incluida en el Sistema Internacional de Unidades<sup>25</sup>.

- **Presión de vapor:** Es la presión a la que a cada temperatura la fase líquida y vapor se encuentran en equilibrio dinámico; su valor es independiente de las cantidades de líquido y vapor presentes mientras existan ambas<sup>26</sup>.
  
- **Caudal de producción:** Se puede aplicar en diferentes escalas, dependiendo de la unidad de estudio requerida.
  - Capacidad de un pozo: Se define como el caudal máximo de bombeo que puede suministrar un pozo sin hacer descender el nivel de agua subterránea en el mismo por debajo de la entrada de la bomba.
  - Capacidad de almacenamiento del acuífero: Se define como la máxima extracción de agua que un acuífero puede sostener sin causar una disminución inaceptable de la carga hidráulica en el acuífero.
  - Producción óptima: Se define como la máxima extracción de agua que una cuenca hidrogeológica puede sostener sin causar una disminución inaceptable de la carga hidráulica en el sistema o causar cambios inaceptables a cualquier otro componente del ciclo hidrológico en la cuenca.
  
- **Presión manométrica:** También llamada sobrepresión, es la presión medida con respecto a la presión atmosférica. La presión manométrica está referenciada a cero con respecto a la presión del aire ambiente (o atmosférico). Esto significa que la presión manométrica varía en función de la altura sobre el nivel del mar y de las condiciones meteorológicas.<sup>27</sup>
  
- **Presión absoluta:** Presión referida al cero absoluto o vacío. Este valor indica la presión total a la que está sometido un cuerpo o sistema, considerando el total de las presiones que actúan sobre él.

---

<sup>25</sup> Definición tomada de la página web mundo compresor. Diccionario técnico.

<sup>26</sup> Definición tomada de sitio web Química.es

<sup>27</sup> Definición tomada de la página web WIKA.

## 4.2. EXPLORACIÓN DE CAMPO

La exploración de campo permite evaluar las condiciones del sitio donde se desarrollará el proyecto permitiendo la preparación de un diseño adecuado, determinando las variaciones de las condiciones del suelo en sus diferentes propiedades. A continuación, se presentará una serie de exploraciones desarrolladas en campo sirven como apoyo para el desarrollo de un estudio hidrogeológico.

- **Piezómetro<sup>28</sup>**: Es un dispositivo que sirve para medir la altura piezométrica en un punto dado de un sistema de acuífero, en cual permite conocer la presión en ese punto y permite establecer de acuerdo con la observación el nivel de agua libre o de una presión. Se conoce el piezómetro como la perforación no explotada, la cual permite la medición del agua subterránea en un punto dado de la capa acuífera. En la Ilustración 6 se puede observar un ejemplo de un piezómetro.

Ilustración 6. Piezómetro



Fuente: Imagen tomada del IDEAM

- **Dataloggers**: Son herramientas que permiten realizar la toma de nivel de agua, temperatura y conductividad en pozos de monitoreo y producción, lagos, perforaciones, ríos, entre otros. Cuenta con una memoria para almacenar las lecturas usando compresión de datos, está compuesto por un sensor de presión y temperatura. La Ilustración 7 presenta un ejemplo de un datalogger.

---

<sup>28</sup> Definición tomada de Glossaire. Sitio Web.

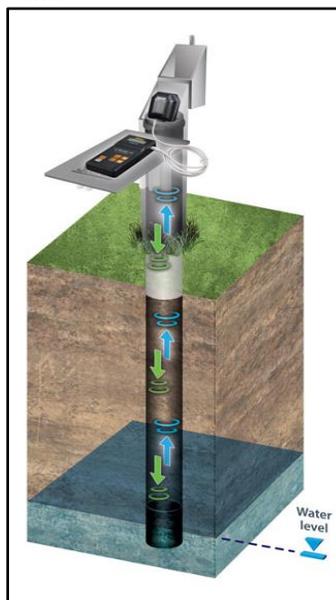
Ilustración 7. Datalogger



Fuente: Tomado de Solinst

- **Medidor de nivel de agua sónico:** Es una herramienta que permite realizar la lectura del nivel de agua que está compuesta por una sonda y una unidad de control. La sonda sónica del medidor se encarga de transmitir una sonda de sonido al pozo o tubería y mide el tiempo que tarda el pulso en regresar después de entrar en contacto con el agua. Las lecturas son proyectadas en la unidad de control. Esta herramienta tiene características que permiten medir el diámetro del pozo, compensaciones, temperatura. La Ilustración 8 presenta gráficamente un ejemplo de medidor de nivel de agua sónico.

Ilustración 8. Medidor de nivel de agua sónico



Fuente: Tomado de Solinst

#### 4.2.1. ESTUDIOS GEOFÍSICOS

La geofísica se define como la ciencia que estudia la tierra desde el punto de vista de la física y su principal enfoque abarca los fenómenos relacionados con la estructura, condiciones físicas, así como historia evolutiva de la tierra.

De acuerdo con lo anterior los estudios geofísicos son técnicas desarrolladas a partir de métodos físicos que buscan identificar la presencia o ausencia de cuerpos y estructuras dentro del subsuelo que no pueden verse a simple vista pero que, por sus propiedades físicas distintas al medio que les rodea pueden ser detectados.

Como ejemplos de aplicación para los estudios geofísicos se pueden aplicar a estructuras arqueológicas, cuerpos de agua, cavernas y yacimientos minerales<sup>29</sup>.

De acuerdo con (Anyelo José) los estudios geofísicos, suelen ser: eléctricos, sísmicos, magnéticos y electromagnéticos. Los métodos eléctricos son una técnica geofísica antigua, empleándose en ingeniería geológica, minería, arqueología, obras públicas y medio ambiente. Los métodos sísmicos tales como Tomografía de Refracción Sísmica (TRS), Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW de sus siglas en inglés), estudia la respuesta del terreno cuando se propaga a través de una onda de compresión producida por medios mecánicos en la superficie. El parámetro que se analiza es el de la Velocidad de propagación de la onda a través de los materiales del subsuelo en función de la compacidad de los mismos. La técnica de Geotecnia aplicada es el Ensayo de Penetración Estándar (SPT de sus siglas en inglés), este es un ensayo in situ de penetración por medio de golpeteo que define parámetros de diseño geotécnico. El objetivo de esta exploración Geofísica y Geotécnica es obtener los parámetros del suelo los cuales serán indispensables al momento de clasificar el tipo de perfil del suelo de acuerdo con los lineamientos establecidos por la Norma Sismo Resistente – NSR 10 y fijar la respuesta de la curva de espectro de aceleración<sup>30</sup>.

- ENSAYO SLUG

Este ensayo Slug (Barra o Lingote) se utiliza para estimar la conductividad hidráulica (k) in situ. Se fundamenta en la medida de la recuperación del nivel del agua después de un cambio instantáneo en el mismo. El ensayo consiste en la introducción de una barra en el pozo, lo que genera un ascenso casi instantáneo

---

<sup>29</sup> Tomado de GeoQualia. Sitio Web.

<sup>30</sup> Moya-Gutiérrez, A.J, Torres-Peña, J.A. and Contreras-Martínez, M, Site characterization using geophysical and geotechnical Prospecting. Case study main road North Central Trunk (National Route 55) at Km 68 + 500 in the Municipality of Pamplona, North of Santander, Colombia. Revista Boletín de Ciencias de la Tierra, 48, pp. 30-45, Febrero-Julio, 2020.

del nivel del agua como si se presentara la introducción de un volumen de agua igual al de un objeto sólido.

Este cambio en el nivel del agua se realiza generando un repentino ascenso o descenso del nivel piezométrico  $H$ , que se recupera hasta condiciones iniciales. La función  $H(t)$  posteriormente se utiliza en la interpretación y evaluación de las propiedades hidráulicas del acuífero en las proximidades del sondeo. El cambio de nivel inicial puede ser negativo si se realiza una extracción de agua, o positivo en caso de inyección.

Entre los métodos de resolución para la evaluación de ensayos tipo slug, los más utilizados son el de Hvorslev (1951) y el de Bouwer y Rice (1976).

La solución de Hvorslev asume:

- Acuífero de extensión infinita.
- Homogéneo, isótropo y de espesor uniforme.
- Superficie piezométrica inicial horizontal.
- La inyección o extracción del volumen de agua es instantánea y produce un cambio en el nivel del agua.
- Las pérdidas en el pozo son despreciables.
- El acuífero es penetrado total o parcialmente.
- El pozo es considerado con un diámetro infinitesimal.
- El flujo hacia el pozo o formación es horizontal.

La solución de Bouwer y Rice asume, además de lo anterior:

- El almacenamiento en el pozo no es despreciable.
- El flujo hacia el pozo es estacionario
- No hay un flujo sobre el nivel freático.

De acuerdo con el artículo “un método para la estimación de transmisividades duales a partir de ensayos slug”<sup>31</sup>, la determinación precisa de la conductividad hidráulica ( $k$ ) y transmisividad ( $T$ ) de un acuífero es parte crucial de muchos estudios hidrogeológicos, especialmente los relacionados con el control de aguas subterráneas en áreas mineras, el mapeo de vulnerabilidad y la delimitación de zonas de protección para tomas de agua. De acuerdo con lo anterior el ensayo del Slug es muy importante en el desarrollo de los proyectos de aguas subterráneas.

---

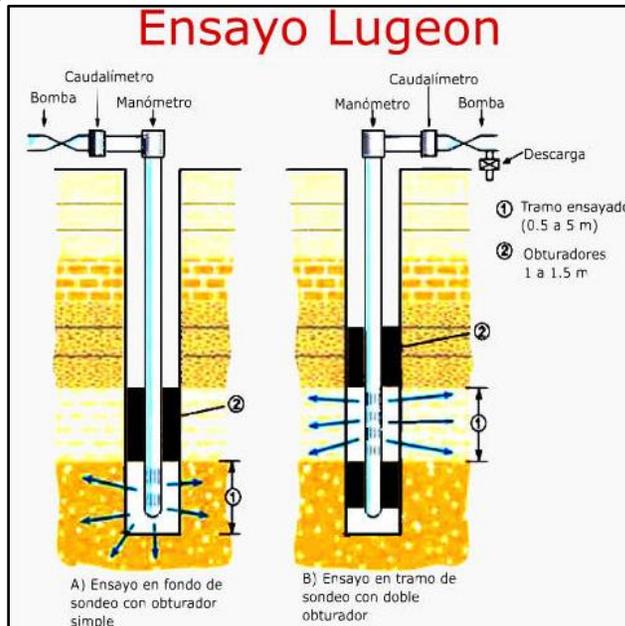
<sup>31</sup> Wolny, F., Marciniak, M. & Kaczmarek, M. A method for the estimation of dual transmissivities from slug tests. *Hydrogeol J* **26**, 407–416 (2018).

- ENSAYO LUGEON

De acuerdo con (Jones, B. R., Van Rooy, J. L.) las pruebas de Lugeon se definen como el método más común utilizado para evaluar la permeabilidad de los macizos rocosos. Se desarrollaron principalmente para determinar la capacidad de fundación de las presas.

Su operación consiste en medir el volumen  $V$  de agua que se genera al inyectar agua a presión constante en el suelo en un tiempo  $t$  determinado. Este ensayo normalmente se realiza a una profundidad de cinco (5) metros aislados por obturadores neumáticos. El procedimiento se divide en cinco (5) intervalos con una duración de diez (10) minutos y cuya presión depende de la presión máxima de prueba, que no exceda el esfuerzo mínimo in situ<sup>32</sup>. La Ilustración 9 ejemplifica la prueba del ensayo de Lugeon.

Ilustración 9. Ensayo Lugeon



Fuente: Tomado de sitio web Geología web

- ENSAYO DE INFILTRACIÓN

Los ensayos de infiltración o de percolación se utilizan para determinar la tasa de infiltración del agua en el suelo, así como la conductividad hidráulica que posee el terreno. El valor será dependiente de las condiciones físicas del terreno como su

<sup>32</sup> Tomado de Geología Web. Sitio Web

porosidad, estructura, textura entre otros<sup>33</sup>.

Con la prueba se establece la velocidad de infiltración del agua en el suelo y es muy utilizado en el diseño de campos de infiltración, modelos hidrogeológicos, balance hídrico, estudio de tránsito de contaminantes y algunas otras aplicaciones más. La Ilustración 10 representa gráficamente un ensayo de infiltración.

Los métodos más conocidos para realizar la prueba de infiltración son:

- Prueba del permeámetro de Guelph.
- Prueba del doble anillo.
- Prueba de Porchet.
- Prueba de Le Franc.
- Prueba de Hvorslev.

Ilustración 10. Ensayo de infiltración



Fuente: Documento técnico

- **PRUEBA DE BOMBEO**

Es una prueba que permite determinar los parámetros hidráulicos de los acuíferos (permeabilidad, transmisividad, coeficiente de almacenamiento) y es imprescindible para conocer el nivel de trabajo y el caudal de explotación del pozo. Estos últimos

---

<sup>33</sup> Tomado de Ferrara Proyectos Especiales. Sitio Web

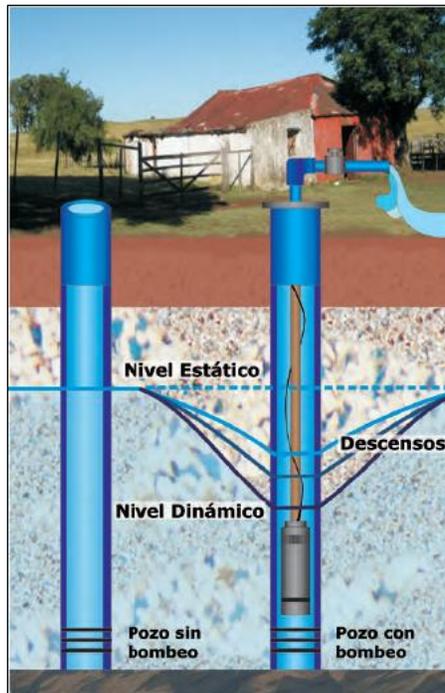
datos son necesarios para dimensionar la bomba que será instalada en el pozo.

Existen diversos tipos de ensayos de bombeos:

- Caudal constante
- Caudal variable

El ensayo consiste en medir la profundidad del agua en el pozo, luego se enciende la bomba a caudal constante o variable dependiendo la prueba y realiza el registro de mediciones en diferentes tiempos establecidos previamente a la prueba, transcurrido un cierto tiempo el nivel del agua se estabilizará o su cambio será muy poco con lo cual se puede decir que se ha estabilizado el nivel. Al finalizar el bombeo el nivel inicia un ascenso hasta llegar al nivel inicial de la prueba, al igual que en el descenso se debe registrar el tiempo que tarda el nivel en recuperarse al momento del ascenso. La Ilustración 11 presenta gráficamente una prueba de bombeo.

Ilustración 11. Prueba de Bombeo



Fuente: Tomado de Manual de Agua Subterránea. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Uruguay.

- TRAYECTORIA

Se definen el trazador como todo carácter específico o toda sustancia solidaria de un cuerpo en movimiento, fundamentalmente del agua subterránea que se desplaza, que permite identificar y describir su movimiento; puede estar presente

de forma natural o ser añadido artificialmente.

Generalmente para esta prueba se utilizan los trazadores artificiales (colorantes, fundamentalmente) los cuales han venido siendo empleados de forma casi exclusiva, el reciente uso de ciertos marcadores propios del agua (físico-químicos y biológicos), como trazadores naturales, amplía las posibilidades de utilización de esta técnica en el campo de la investigación hidrogeológica.

La metodología de los ensayos de trazado en la investigación hidrogeológica requiere el marcarse un plan de trabajo detallado a seguir durante la organización y realización de los ensayos, de forma que no dé lugar a improvisaciones y se asegure el buen desarrollo de los trabajos. Así, es necesario un conocimiento previo, desde el punto de vista geológico e hidrogeológico, de la zona que se va a estudiar; además de elegir adecuadamente el trazador y la cantidad que va a ser inyectada en el sistema acuífero. Por lo general, se suele emplear un notable exceso de trazador; sin embargo, el obtener un buen ensayo depende más de la calidad del muestreo que de la cantidad de trazador inyectada, si se dispone de una analítica lo suficientemente precisa.

#### 4.3. METODOS DE EXTRACCIÓN

- **Aljibe:** Los aljibes son excavaciones manuales de gran diámetro, como se evidencia en la Ilustración 12; estos buscan llegar al nivel freático para a partir de ese punto profundiza la excavación por debajo de la tabla de agua y de esta forma acumular agua subterránea que está disponible para ser bombeada.<sup>34</sup>

---

<sup>34</sup> MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Principios básicos para el conocimiento y monitoreo de las aguas subterráneas en Colombia, Imprenta Nacional de Colombia, Bogotá. MinAmbiente, 2015; p.39

Ilustración 12. Aljibe



Fuente: Guajira, Colombia

- **Pozo:** Un pozo es un agujero, excavación o túnel vertical que perfora la tierra hasta una profundidad suficiente para alcanzar un recurso, ya sea agua subterránea u otras sustancias, como petróleo (Ordoñez, 2011) como se indica en la Ilustración 13. Se busca alcanzar un estrato o formación rocosa que se encuentre saturado en el recurso buscado (Tarbuck & Lutgens, 2005).

Los pozos de agua subterránea sirven como depósitos. El agua que satura las formaciones rocosas migra hacia el pozo y de este, puede ser bombeada hacia la superficie. Según la metodología de perforación utilizada los pozos de agua subterránea se pueden clasificar en:

- Pozos artesanales: Se trata de los pozos excavados manualmente, utilizando pala y pico. Estos pozos presentan profundidades de unos cuantos metros.
- Pozos perforados: Son los pozos que se perforan utilizando maquinaria hidráulica, que tiene una punta perforadora o martillo. Estos pozos alcanzan mayores profundidades que en el caso de los artesanales.

Ilustración 13. Pozo



Fuente: Cartilla Técnica: Aguas Subterráneas – Acuíferos.

#### 4.4. NORMATIVIDAD

A continuación, se presentan las disposiciones reglamentarias aplicadas en Colombia para el manejo de aguas subterráneas, las cuales abarcan las políticas ambientales promulgadas por los diferentes entes reguladores de orden nacional, regional y departamental. Dentro de los cuales se pueden encontrar los Ministerios, las corporaciones autónomas regionales, secretarías ambientales y demás autoridades que regulen las prácticas ambientales nacionales.

La Tabla 2 presenta las reglamentaciones jurídicas aplicables al manejo de aguas subterráneas en Colombia:

Tabla 2. Normatividad ambiental

NORMA	DESCRIPCIÓN
<b>NTC-ISO 5667-11</b>	Guía para el Muestreo de Aguas Subterráneas.  Esta norma pretende ser una guía para el diseño de programas y técnicas de muestreo para el manejo de muestras de agua tomadas de aguas subterráneas, para evaluación física, química y microbiológica.
<b>Ley 99 de 1993. Art. 43</b>	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.  Tasas por Utilización de Aguas. La utilización de aguas por personas naturales o jurídicas, públicas o privadas, dará lugar al cobro de tasas fijadas por el Gobierno Nacional que se destinarán

NORMA	DESCRIPCIÓN
	al pago de los gastos de protección y renovación de los recursos hídricos, para los fines establecidos por el Artículo 159 del Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.
<b>Decreto 155 de 2004.</b>	<p>Por el cual se reglamenta el artículo 43 de la Ley 99 de 1993 sobre tasas por utilización de aguas y se adoptan otras disposiciones.</p> <p>Define en lo relativo a las tasas por utilización de aguas superficiales, las cuales incluyen las aguas estuarinas, y las aguas subterráneas, incluyendo dentro de estas los acuíferos litorales. Excluye las aguas marítimas.</p>
<b>Decreto 3100 de 2003</b>	<p>Por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se toman otras determinaciones.</p> <p>Tasa retributiva por la contaminación que se genera, está más orientado a los cuerpos de aguas superficiales. Las corporaciones Autónomas tienen la competencia del recaudo. Los dineros de la tasa retributiva por vertimientos se destinarán exclusivamente a proyectos de inversión de descontaminación hídrica y monitoreo de calidad de agua.</p>
<b>Constitución Política Colombiana. Art. 78-80</b>	<p>Establece el derecho a gozar de un ambiente sano. Garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de dichos fines.</p> <p>Es responsabilidad del Estado planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución.</p>
<b>Decreto Ley 2811 de 1974</b>	<p>Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.</p> <p>El ambiente es patrimonio común. El Estado y los particulares deben participar en su preservación y manejo, que son de utilidad pública e interés social. Así mismo regula el manejo de los recursos naturales renovables, entre ellos: Las aguas en cualquiera de sus estados; Los recursos biológicos de las aguas y del suelo y el subsuelo del mar territorial y de la zona económica de dominio continental e insular de la República.</p>
<b>Decreto 1541 de 1978</b>	<p>Por el cual se reglamenta la Parte III del Libro II del Decreto-Ley 2811 de 1974: "De las aguas no marítimas" y parcialmente la Ley 23 de 1973."</p> <p>Reglamenta las normas relacionadas con el recurso de aguas en todos sus estados, y comprende entre otros los siguientes aspectos: 1) El dominio de las aguas, cauces y riberas, y normas que rigen su aprovechamiento. 2) La ocupación de los cauces y la declaración de reservas de agotamiento. 3) Las restricciones y</p>

NORMA	DESCRIPCIÓN
	limitaciones al dominio. 4) Las condiciones para la construcción de obras hidráulicas que garanticen la correcta y eficiente utilización del recurso. 5) La conservación de las aguas y sus cauces. 6) Las cargas pecuniarias en razón del uso del recurso y para asegurar su mantenimiento y conservación, así como el pago de las obras hidráulicas que se construyan en beneficio de los usuarios. 7) Las sanciones y las causales de caducidad a que haya lugar por la infracción de las normas o por el incumplimiento de los usuarios.
<b>Ley 9 de 1979</b>	<p>Por la cual se dictan medidas sanitarias.</p> <p>Sobre la protección del medio ambiente, establece normas para el control sanitario de los usos del agua, residuos líquidos, residuos sólidos, disposición de excretas, áreas de captación de aguas, de las aguas superficiales, de las aguas subterráneas, de las aguas lluvias, de la conducción, de las estaciones de bombeo, de la potabilización.</p>
<b>Decreto 1594 de 1984</b>	<p>Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.</p> <p>Derogado por el Art. 79 del Decreto 3930 de 2010, salvo los artículos 20 y 21. Determinan las sustancias que se consideran sustancias de interés sanitario. Entre ellos, mercurio, cromo, cianuro, níquel, plomo, selenio, algunos etanos clorados, diclorobencenos, hidrocarburos aromáticos.</p>
<b>Decreto 1524 de 1995</b>	<p>Por el cual se delegan las funciones presidenciales de señalar políticas generales de administración y control de eficiencia en los servicios públicos domiciliarios, y se dictan otras disposiciones.</p> <p>Los funcionarios que integran la Comisión Reguladora de Agua Potable y Saneamiento Básico, comienzan a ejercer las funciones asignadas a la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico prevista en el artículo 69 de la Ley 142 de 1994.</p>
<b>Ley 373 de 1997</b>	<p>Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua.</p> <p>Todo plan ambiental regional y municipal debe incorporar obligatoriamente un programa para el uso eficiente y ahorro del agua. Las Corporaciones Autónomas Regionales aprobarán dichos planes. Los planes quinquenales, deben contemplar: Reducción de pérdidas, Reúso obligatorio del agua, De los medidores de consumo, Consumos básicos y máximos, Incentivos tarifarios, De los estudios hidrogeológicos, Campañas educativas a los usuarios, Protección de zonas de manejo especial y sanciones.</p>
<b>Decreto 901 de 1997</b>	<p>Por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa o indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se establecen las tarifas de éstas.</p>

NORMA	DESCRIPCIÓN
	Establece las definiciones, su forma de cálculo, responsables del recaudo y proceso para reclamaciones.
<b>Ley 430 de 1998</b>	<p>Por la cual se dictan normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones.</p> <p>Regula todo lo relacionado con la prohibición de introducir desechos peligrosos al territorio nacional, en cualquier modalidad según lo establecido en el Convenio de Basilea y sus anexos. Establece los principios que se deben considerar, las responsabilidades de los generadores y receptores de residuos peligrosos.</p>
<b>Ley 599 de 2000</b>	<p>Por la cual se expide el Código Penal.</p> <p>Habla de los delitos y las penas contra los recursos naturales y el medio ambiente, de los delitos contra los recursos naturales, de los daños en los recursos naturales, de la contaminación ambiental.</p>
<b>Decreto 302 de 2000</b>	<p>Por el cual se reglamenta la Ley 142 de 1994, en materia de prestación de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado.</p> <p>Regula lo pertinente a la prestación de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado. Obligaciones y deberes de los usuarios, De la conexión, Del régimen de acometidas y medidores, Del mantenimiento de las instalaciones domiciliarias, Causales de suspensión de los servicios, Causales de corte y terminación del contrato.</p>
<b>Decreto 1713 de 2002</b>	<p>Por el cual se reglamenta la Ley 142 de 1994, la Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo, y el Decreto Ley 2811 de 1974 y la Ley 99 de 1993 en relación con la Gestión Integral de Residuos Sólidos".</p> <p>Normas sobre características y calidad del servicio de Aseo, Componentes, modalidades y clases, Almacenamiento y presentación, Recolección, Transporte, Barrido y limpieza de áreas públicas, Estaciones de transferencia, Sistema de aprovechamiento de residuos sólidos, Libertad de competencia y no abuso de posición dominante, De los deberes y derechos de las personas prestadoras del servicio de aseo, Relaciones entre los usuarios y la persona prestadora del servicio, De los derechos y deberes de los usuarios, de las autoridades ambientales en la gestión integral de los residuos sólidos, competencia y procedimientos para control y vigilancia.</p>
<b>Decreto 1729 de 2002</b>	Por el cual se reglamenta la Parte XIII, Título 2, Capítulo III del Decreto-ley 2811 de 1974 sobre cuencas hidrográficas, parcialmente el numeral 12 del Artículo 5° de la Ley 99 de 1993 y se dictan otras disposiciones.

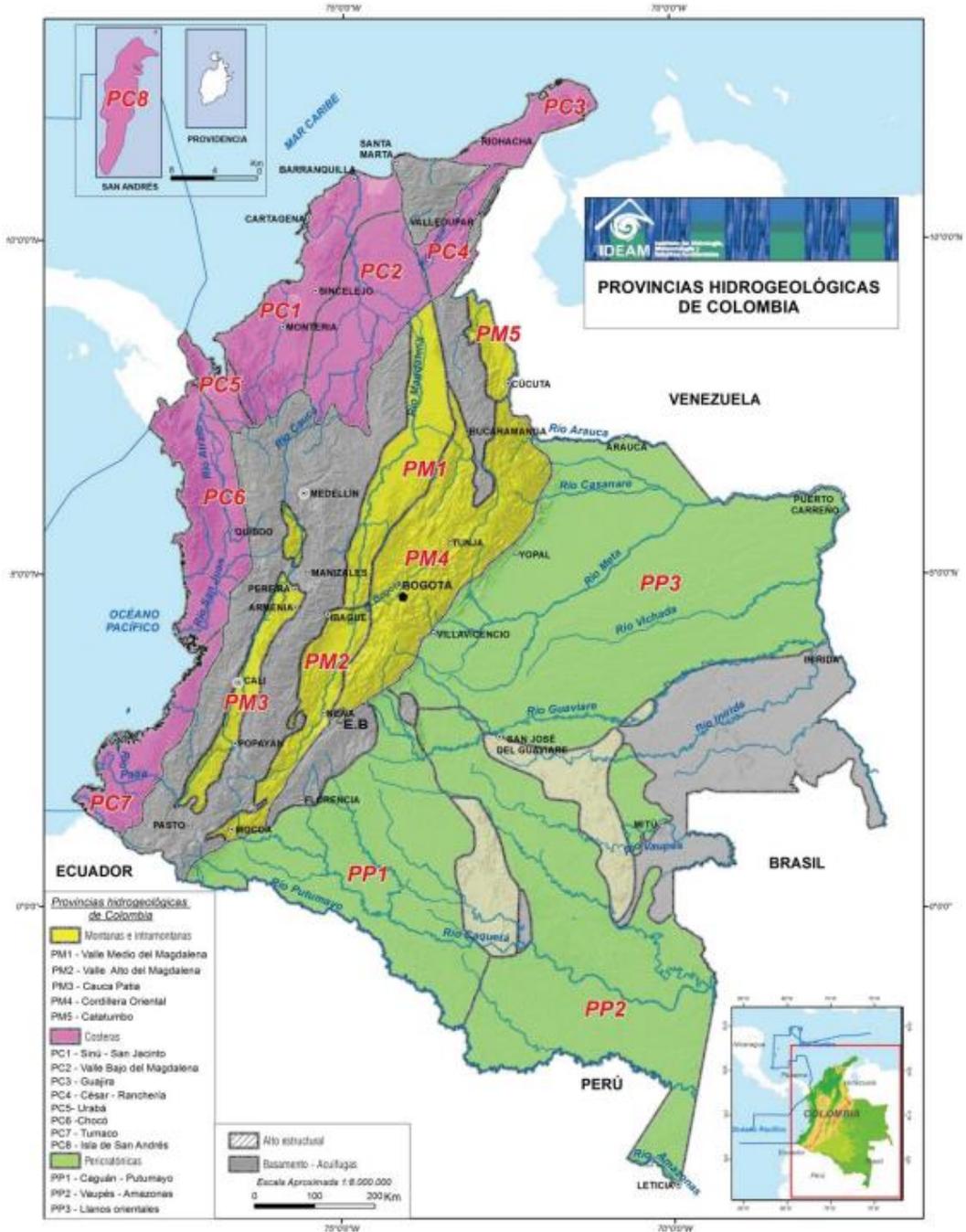
NORMA	DESCRIPCIÓN
	Definición, delimitación y uso de cuenca. Medidas de protección.
<b>Decreto 838 de 2005</b>	<p>Por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones.</p> <p>Localización de áreas para la disposición final de residuos sólidos, Del interés social y de utilidad pública, Procedimiento, criterios, metodología, prohibiciones y restricciones para la localización de áreas para la disposición final de residuos sólidos, consideraciones ambientales y técnicas de planeación, construcción y operación de rellenos sanitarios, Del control y monitoreo. Sistemas regionales de disposición final de residuos sólidos.</p>
<b>Decreto 1076 de 2015</b>	Por el cual se compila el Decreto 1541 de 1978 y reúne las normas del sector del medio ambiente.
<b>Resolución 0330 de 2017</b>	Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS.

Fuente: Elaboración propia con base en normatividad ambiental existente

#### 4.5. DESCRIPCIÓN DEL TERRITORIO

Como parte del contexto geográfico de aguas subterráneas en Colombia se pueden apreciar 16 provincias hidrogeológicas que fueron delimitadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, con base en el mapa geológico de Colombia, las características geomorfológicas y las condiciones hidrogeológicas. Las provincias hidrogeológicas delimitadas por el IDEAM se ilustran gráficamente a continuación:

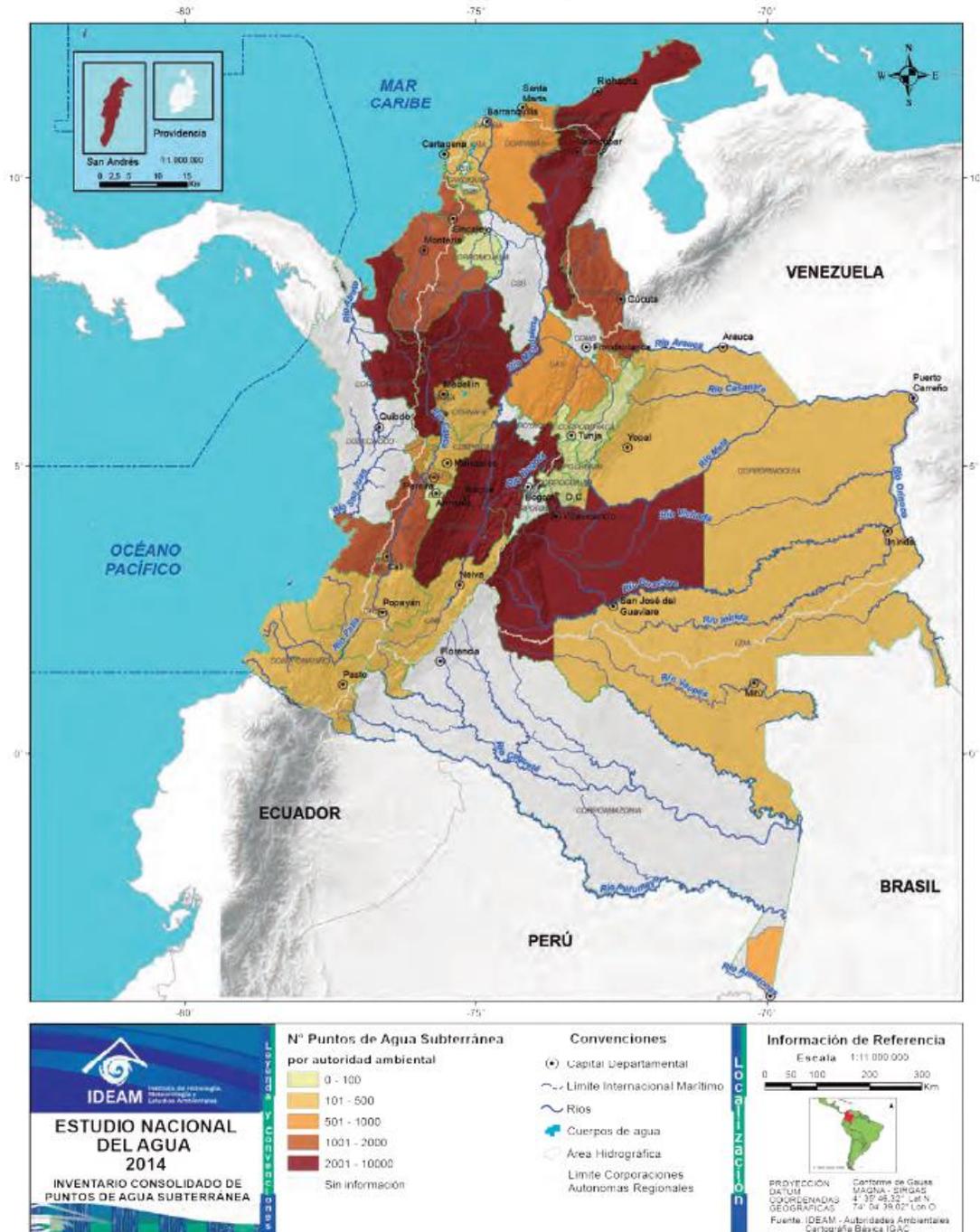
Ilustración 14. Provincias hidrogeológicas delimitadas por el IDEAM



Fuente: IDEAM

Con el mapa de inventarios consolidado de puntos de agua subterránea se puede conocer a nivel regional cuantos puntos existen por captación a lo largo del territorio nacional, cuales se encuentran cerca del área de estudio y con ello la importancia del recurso hídrico. La Ilustración 15 representa gráficamente lo anteriormente descrito:

Ilustración 15. Mapa de inventario consolidado de puntos de agua subterránea



Fuente: IDEAM

#### 4.6. ESTADO DEL ARTE:

La Guía para el Uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA fue realizado por el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) de Chile, el cual fue publicado en el año 2012 con la finalidad de establecer una base con contenidos que deben acompañar una modelación de tal manera que presente información relevante.

En el año 2019, el IDEAM publica el documento de Estudio Nacional del Agua 2018, el cual tiene como objetivo dar a conocer la riqueza acuífera del país. En el capítulo tres (3), se aborda el tema de las aguas subterráneas, el cual es objeto de estudio para el desarrollo del presente documento.

El trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos “Modelo hidrogeológico conceptual a partir de información secundaria, en los alrededores del centro urbano del municipio de Chiquinquirá”, Universidad Católica de Colombia, año 2017, describe el modelo hidrogeológico conceptual que permite entender la circulación del agua subterránea e identificar las condiciones de recarga y descarga de agua.

El libro Hidrología Subterránea, Custodio-Llamas, el cual se considera fundamental en la elaboración del presente documento al ser el libro pionero en conceptos de acuíferos subterráneos.

El Manual de Agua Subterránea, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, Montevideo Uruguay, año 2012, aborda temas conceptuales relevantes en el desarrollo de esta guía conceptual.

El libro Hidrología en la Ingeniería, Monsalve Sáenz, 2da edición, del cual se toman los conceptos básicos de la hidrología y en el capítulo trece (13) se aborda el tema de las aguas subterráneas.

El libro Hidráulica de Tuberías, abastecimiento de agua, redes, riegos, Juan Saldarriaga, año 2007, el cual presenta gran influencia en la elaboración del presente informe, abordando conceptos esenciales de la hidráulica de tuberías y redes de distribución.

La Cartilla Técnica “Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico”, Lima Perú, año 2011, familiarización e introducción a los conceptos básicos de la hidrología y los elementos que la componen.

El libro Elementos de Diseño para Acueductos y Alcantarillados, Ricardo López Cualla, 2da edición, guía fundamental para la comprensión y aprendizaje en el

diseño de sistemas de bombeo.

El libro Las Aguas Subterráneas, un enfoque práctico, Vélez M., Ortiz C., Vargas M., documento guía primordial en el desarrollo de la presente guía conceptual ya que cuenta con parámetros y definiciones puntuales que abarcan las aguas subterráneas.

#### 4.7. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Los modelos hidrogeológicos conceptuales son representaciones de las condiciones de los sistemas hidrogeológicos. Esta representación incluye la geometría de los acuíferos, delimitación de unidades hidrogeológicas de acuerdo con sus posibilidades de almacenar y transmitir agua, características hidráulicas de los acuíferos, posición de los niveles piezométricos, condiciones del flujo de las aguas subterráneas y su relación con los componentes del ciclo hidrológico, características hidroquímicas y eventualmente isotópicas y delimitación de zonas de recarga, tránsito y descarga. En términos generales, sintetiza las condiciones básicas del estado y dinámica de las aguas subterránea en el subsuelo y sus relaciones con los cuerpos de agua superficial y los aportes atmosféricos. Se realiza con base en el análisis e interpretación de información geológica, hidrológica, hidráulica, hidroquímica y permite tener una visión del comportamiento de los acuíferos o sistemas acuíferos de un área dada a la escala deseada que permiten un adecuado aprovechamiento de este recurso.

Con la intención de proponer información que complemente la guía para la extracción de agua subterránea se utilizan los elementos que componen un modelo hidrogeológico conceptual dado que a partir de estos se logra una adecuada caracterización del sistema hidrogeológico que lleva a un adecuada utilización y gestión del recurso. Por esta misma razón, aunque se utilicen los pasos del modelo hidrogeológico conceptual esta guía no profundiza en la compilación de este modelo, ya que es un paso posterior que busca la caracterización mas no el aprovechamiento, sin embargo, en la sección seis (6) de la guía se expone la generalidad de estos modelos hidrogeológicos conceptuales.

## 5. METODOLOGÍA

### 5.1. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Para el desarrollo de la guía conceptual es necesario buscar información de diversas fuentes que permitan la definición de las variables que pueden ser aplicadas al desarrollo de proyectos de hidrogeología. De esta manera poder identificar si existen guías que cumplan con el objeto del presente proyecto a nivel nacional e identificar algunas guías a nivel regional con los países más cercanos.

Como parte de la recolección de información para el desarrollo de la guía conceptual se elaboró la secuencia ordenada de búsqueda donde se tomó información oficial de las diferentes entidades nacionales que permitan conocer los datos de variables requeridas para tomar como fuente bibliográfica y conocer tanto la normatividad vigente como las entidades ambientales encargadas de autorizar los permisos de concesión.

### 5.2. ENTIDADES AMBIENTALES CONSULTADAS

**Bases de Datos:** Se consultaron múltiples bases de datos, bibliografía y repositorio de la Universidad que permitieron profundizar en las diferentes metodologías para la extracción de agua subterránea.

**Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM:** Se utilizó la información de hidrología subterránea nacional de fuentes oficiales, principalmente del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales y de las corporaciones autónomas de los diferentes departamentos.

**Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC:** A través del Instituto Geográfico Agustín Codazzi se identificó la información de geología nacional que coadyuve a las demás fuentes de orden nacional para la identificación de acuíferos o zonas que presenten almacenamiento de agua subterránea en Colombia.

**Servicio Geológico Colombiano – SGC:** Se obtuvieron los mapas y documentos detallados de la geología y geomorfología, mapas de amenazas sísmicas y amenaza volcánica, mapa de amenazas de movimientos en masa, entre otros, ya que el SGC es el encargado de realizar el estudio de los recursos naturales y los riesgos de amenazas.

**Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible:** Entes corporativos de carácter público dotados de autonomía administrativa y financiera para administrar los recursos naturales y el medio ambiente; a nivel regional son la primera autoridad ambiental y deben garantizar el seguimiento y control de los

permisos y/o concesiones avaladas.

**AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES – ANLA:** Autoridad encargada de que los proyectos, obras o actividades sujeto de licenciamiento, permiso o trámite ambiental cumplan con la normativa ambiental, de tal manera que contribuyan al desarrollo sostenible ambiental del país.<sup>35</sup>

### 5.3. DESARROLLO DE DOCUMENTO FINAL

Elaboración de la guía conceptual para la extracción de aguas subterráneas en Colombia y presentación detallada de la misma, se presenta como un documento anexo llamado “Guía Conceptual para la Extracción de Aguas Subterráneas en Colombia”.

La selección de los pasos de la guía fue desarrollada partiendo de diferentes fuentes indicadas en la sección 5.1, referencias bibliográficas académicas nacionales e internacionales y guías de aguas subterráneas internacionales.

El desarrollo de la guía inicia con la definición de las normativas de aguas subterráneas que son relevantes en el país, con esto el lector podrá definir de acuerdo al uso que se dará al recurso si requiere realizar un trámite o no ante la autoridad ambiental correspondiente.

Una vez definida la normatividad vigente se procedió a precisar cuáles son las características geológicas nacionales y como se clasifican de forma oficial como unidades hidrogeológicas en Colombia, con esta información el lector en un primer paso puede conocer si en la zona de desarrollo donde se realizará el aprovechamiento de agua subterránea tendrá en mayor medida posibilidades de desarrollar la captación.

Continuando con la elaboración de la guía se logró identificar que se requieren datos generales de la zona donde se desea realizar la captación, para ello se hace necesario la elaboración de un inventario de las diferentes captaciones que se encuentran presentes en la zona en las cuales se podrá establecer las profundidades y los tipos de captaciones cercanas al lugar donde se aprovechará el recurso, adicionalmente se indicará los valores de precipitaciones de la zona que serán un indicativo muy importante en la posibilidad de encontrar agua subterránea ya que si es una zona con altas precipitaciones a lo largo de un año podremos conocer si existirá una buena posibilidad de recarga del acuífero.

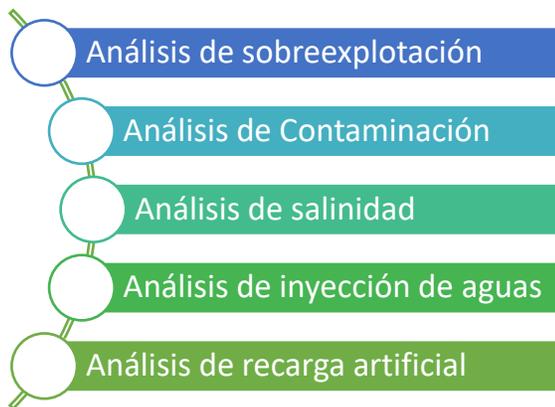
---

<sup>35</sup> Decreto 3573 de 2011. Por el cual se crea la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales – ANLA y se dictan otras disposiciones

El siguiente paso que se determinó en el desarrollo de la guía comprende la identificación de la demanda requerida de acuerdo con el uso del agua subterránea a captar, se definen los tipos de captaciones posibles de agua subterránea y cómo se realiza el proceso de extracción de agua, finalmente se presentan procesos constructivos típicos en pozos de agua subterránea.

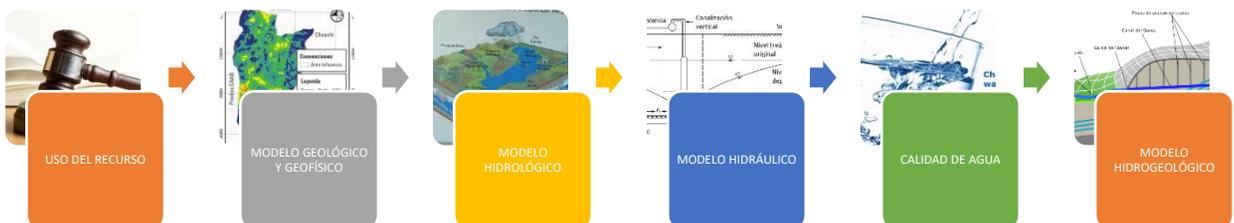
Para concluir, como último paso en la guía se presenta el capítulo de calidad de agua en el que se identificaron las posibles fuentes de contaminación del agua y los parámetros más relevantes de acuerdo con la normatividad colombiana para una buena calidad de agua apta para el consumo humano.

Como anexo de la guía se decidió realizar un capítulo de introducción a modelos hidrogeológicos conceptuales y numéricos que permitan a los lectores conocer que se puede representar de manera regional o local las condiciones hidrogeológicas de una zona donde se puedan realizar análisis particulares como son:



A continuación, se da a conocer el esquema de manera general con el paso a paso de la guía conceptual.

Gráfico 1. Diagrama metodología guía conceptual



Fuente: Elaboración propia

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Con el presente trabajo de grado se propuso una guía conceptual para la extracción de agua subterránea, la cual corresponde a la recopilación de información descrita en un paso a paso para un adecuado aprovechamiento de agua subterránea, que tiene en cuenta aspectos normativos, aspectos técnicos y de gestión de agua, que puede ser utilizada por personas naturales, jurídicas, instituciones u otros grupos de interés.
2. La guía se estructuró siguiendo los elementos que conforman un modelo hidrogeológico conceptual, dado que este sistema permite una correcta caracterización hidrogeológica y a su vez busca una correcta gestión del recurso hídrico subterráneo.
3. La guía incluye seis apartados: uso del recurso, modelo geológico geofísico, modelo hidrológico, modelo hidráulico, calidad del agua y modelo hidrogeológico, en los cuales se explican conceptos, procedimientos, generalidades y buenas prácticas para llevar a cabo la captación de agua subterránea.
4. A través de la guía, el usuario tendrá la oportunidad de conocer cómo se hace un correcto aprovechamiento de agua subterránea garantizando el cumplimiento de la norma, tener estándares de calidad, uso de buenas prácticas y promover para la una buena gestión del recurso hídrico.
5. Se estableció que dentro de la guía hay elementos que poseen un carácter técnico muy específico que podría poner en jaque la ejecución de la misma, dado que existen actividades que requieren del apoyo de personal experto para su puesta en marcha, es por esto, que se estableció que esta guía es de conceptualización, buscando el conocimiento general del proceso y no de la especificidad de cada paso.
6. La última sección de la guía habla de la construcción del modelo hidrogeológico conceptual, que es un paso de caracterización hidrogeológica que va más allá de lo que es un proceso de aprovechamiento de agua subterránea, es por esto, que a modo de recomendación se propone como paso a seguir la elaboración de un elemento más detallado de la guía, que incluya la formulación de modelos conceptuales, modelos numéricos, solución de problemas específicos como sobreexplotación, contaminación de acuíferos, entre otros.
7. Finalmente, se recomienda hacer pruebas de campo de esta guía, en la que se ponga en revisión la misma, buscando obtener retroalimentación y así garantizar una correcta utilización.

## 7. ANEXOS

- Anexo 1. Guía Conceptual para la extracción de aguas subterráneas en Colombia.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Jumapam.gob.mx, «JUNTA MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DE MAZATLÁN, INICIO, CULTURA DEL AGUA, Distribución de Agua en el Planeta [sitio web]. Mazatlán; [Consultado: 04 de octubre de 2021]. Disponible en:» [En línea]. Available: <http://jumapam.gob.mx/cultura-del-agua/distribucion-de-agua-en-el-planeta/>.
- [2] M. d. A. Subterránea, «URUGUAY. MINISTERIO DE GANADERÍA AGRICULTURA Y PESCA. Manual de Agua Subterránea (Montevideo, 2012). COLLAZO CARABALLO, María Paula y MONTAÑO XAVIER, Jorge.» [En línea].
- [3] IDEAM-ENA, «INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, CAPÍTULO 4, OFERTA Y USO DE AGUA SUBTERRANEA EN COLOMBIA, Reservas de agua subterránea en Colombia ; [Consultado: 24 de noviembre de 2021].».
- [4] Minvivienda, «MINISTERIO DE VIVIENDA, INICIO, Viceministerio de Agua y Saneamiento, Guajira Azul [sitio web]; [Consultado: 24 de noviembre de 2021]. Disponible en:» pp. <https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-saneamiento-basico/guajira-azul#gazul1>.
- [5] M. D. A. Y. D. SOSTENIBLE., «Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos. Vélez Otálvaro, María Victoria, Otálvaro Hoyos, Doris Liliana.» *Bogotá. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, 2014.*
- [6] W. M. HURTADO, «Sobre la influencia de la distribución espacial del contenido de finos en la conductividad hidráulica de mezclas areno-arcillosas. Universidad Nacional de Colombia.» <https://www.virtualproco.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/biblioteca/sobre-la-influencia-de-la-distribucion-espacial-del-contenido-de-finos-en-la-conductividad-hidraulica-de-mezclas-areno-arcillosas>.
- [7] Chubut, «MINISTERIO DE AMBIENTE Y CONTROL DEL DESARROLLO SOSTENIBLE CHUBUT, INICIO, Balance Hídrico [sitio web]. Chubut; [Consultado: 04 de octubre de 2021]. Disponible en:» p. <http://ambiente.chubut.gov.ar/>.
- [8] Siac, «SISTEMA DE INFORMACIÓN AMBIENTAL DE COLOMBIA, Suelo [sitio web]. [Consultado: 08 de octubre de 2021]. Disponible en:» <http://www.siac.gov.co/suelo>.
- [9] Significados, «SIGNIFICADOS, Precipitación. [sitio web]; [Consultado: 06 de octubre de 2021]. Disponible en:» <https://www.significados.com/precipitacion/>.
- [10] Definición, «DEFINICIÓN. DE, Definición [sitio web]; [Consultado: 05 de octubre de 2021]. Disponible en:» p. <https://definicion.de/temperatura/>.
- [11] IDEAM, «INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, WEB, TIEMPO Y CLIMA, Radiación Solar [sitio web]; [Consultado: 06 de octubre de 2021]. Disponible en:» pp. <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar-ultravioleta>.

- [12] ECURED, ECURED, Evapotranspiración [sitio web]. Chubut; [Consultado: 04 de octubre de 2021]. Disponible en: <https://www.ecured.cu/Evapotranspiraci%C3%B3n>.
- [13] Fao, FAO.ORG, Glosario de términos sobre humedad del suelo [sitio web]; [Consultado: 11 de octubre de 2021]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/y4690s/y4690s02.htm>.
- [14] G. PÉREZ, «Ciclohidrologico.com,» [En línea]. Available: <https://www.ciclohidrologico.com/evaporacin>.
- [15] InfoAgronomo, «InfoAgronomo - ¿Qué es la Capacidad de Campo y Punto de Marchitez Permanente?,» [En línea]. Available: <https://infoagronomo.net/capacidad-de-campo-y-punto-de-marchitez-permanente/>.
- [16] EcuRed, «Ecured.cu - Capacidad de campo y Punto de marchitez,» [En línea]. Available: [https://www.ecured.cu/Capacidad\\_de\\_campo\\_y\\_Punto\\_de\\_marchitez](https://www.ecured.cu/Capacidad_de_campo_y_Punto_de_marchitez).
- [17] cambridgemonitor, « cambridgemonitor.org - Que Es La Presion Atmosferica Y Como Se Mide, Cómo Medir La Presión Atmosférica,» [En línea]. Available: <https://cambridgemonitor.org/que-es-la-presion-atmosferica-y-como-se-mide/>.
- [18] Mundocompresor, «Mundocompresor.com - Presión atmosférica,» [En línea]. Available: <https://www.mundocompresor.com/diccionario-tecnico/presion-atmosferica>.
- [19] Química, «Quimica.es - Presión\_de\_vapor,» [En línea]. Available: [https://www.quimica.es/enciclopedia/Presi%C3%B3n\\_de\\_vapor.html](https://www.quimica.es/enciclopedia/Presi%C3%B3n_de_vapor.html).
- [20] Glossaire, «Glossaire-eau.fr - Piezómetro,» [En línea]. Available: <http://www.glossaire-eau.fr/es/concept/piez%C3%B3metro>.
- [21] Geoqualia, «Geoqualia - Estudios Geofísicos: Qué son?,» [En línea]. Available: <https://geoqualia.com/estudios-geofisicos-que-son/>.
- [22] A. MOYA, Caracterización de Sitio empleando Prospección Geofísica y Geotécnica. Caso de estudio Vía principal Troncal Central del Norte (Ruta Nacional 55) a la altura del Km 68+500 en el Municipio de Pamplona, Norte De Santander (Colombia), Pamplona, Norte de Santander: Boletín de Ciencias de la Tierra, 2020.
- [23] WOLNY, «Wolny, F., Marciniak, M., & Kaczmarek, M. (2018). A method for the estimation of dual transmissivities from slug tests. Hydrogeology Journal, 26(2), 407-416. doi,» pp. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-017-1682-1>.
- [24] GEOLOGIAWEB, «Ensayo Lugeon [ PROCEDIMIENTO Y EXPLICACIÓN ] Ejemplo,» [En línea]. Available: <https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/ensayo-lugeon/>.
- [25] Ferrara, «Ferrara.cl - ENSAYOS DE INFILTRACIÓN | Ferrara,» [En línea]. Available: <https://ferrara.cl/servicios/exploraciones-geotecnicas/campanas-geotecnicas/ensayos-de-infiltracion/>.
- [26] Aquist, «Aquist - La elaboración del Modelo Hidrogeológico Numérico - AQUIST,» [En línea]. Available: <https://www.aquist.cl/2021/02/26/elaboracion-del-modelo-hidrogeologico-numerico/>.

- [27] Ecured, «Ecured.cu - Aljibe,» [En línea]. Available: <https://www.ecured.cu/Aljibe>.
- [28] JONES, «Jones, B. R., Van Rooy, J. L., & Dippenaar, M. A. (2019). Lugeon tests at partial saturation: Experimental and empirical contributions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52(2), 351-372. doi,» pp. <http://dx.doi.org/10.1007/s00603-018-1592-0>.
- [29] R. RAMOS, «Rodríguez Ramos, B. P., Velandia, F., & Cardenas, R. (2008). Teledetección y SIG aplicados a la exploración geológico-geofísica en el altiplano nariñense - colombia. *Geología Colombiana*, 33, 79-90. Retrieved from:,» pp. <https://www.proquest.com/scholarly-journals/teledetección-y-sig-aplicados-la-exploración/docview/1677569878/se-2?accountid=45660>.
- [30] S. SAN ROMÁN, «Sánchez San Román, F. J., (2007). Contaminación de las Aguas Subterráneas. Departamento de Geología, Universidad de Salamanca » pp. <https://www-virtualpro-co.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/biblioteca/contaminaci-n-de-las-aguas-subterr-neas>.
- [31] ÁREA METROPOLITANA VALLE DE ABURRÁ. (2019). Manual de Monitoreo de Agua Subterránea. Guía para la toma de niveles piezométricos y muestras de agua para análisis fisicoquímicos, hidrogeoquímicos e isotópicos en captaciones de agua subterránea. Medellín, Antioquia. <https://www.metropol.gov.co/area/Documents/transparencia/M-GAA-RR-02%20Manual%20para%20el%20monitoreo%20de%20aguas%20subterraneas.pdf>