

Caracterización hidrogeológica de los acuíferos subsuperficiales de dos localidades de la sabana de Bogotá: Evaluación de Parámetros hidrogeológicos, Vulnerabilidad a la Contaminación y Recarga Potencial.



Francisco Javier Serrato Parra

Programa De Geología

Facultad De Ciencias Básicas

Universidad De Pamplona

Villa del Rosario

2023

Caracterización hidrogeológica de los acuíferos subsuperficiales de dos localidades de la sabana de Bogotá: Evaluación de Parámetros hidrogeológicos, Vulnerabilidad a la Contaminación y Recarga Potencial.

Francisco Javier Serrato Parra

Tutores

Ilich Sebastián Villamizar Solano

Enith Yamile Murcia Cabrejo

Trabajo de grado

Práctica empresarial

Programa De Geología

Facultad De Ciencias Básicas

Universidad De Pamplona

Villa del Rosario

2023

1 Agradecimientos

Agradezco profundamente a la Universidad de Pamplona y al personal que hace parte de esta, por confiar en mis capacidades desde el comienzo, abrirme las puertas de su institución y permitirme llevar a cabo todo mi proceso educativo en sus instalaciones.

De igual manera, expreso nuestros agradecimientos a toda la Facultad de Ciencias Básicas, a mis docentes quienes, con su sabiduría y sus valiosos conocimientos, me hicieron crecer día a día hasta lo que hoy en día soy, muchas gracias a cada una de ustedes por su paciencia, dedicación y apoyo.

Finalmente quiero expresar nuestro más grande y sincero agradecimiento a la empresa INERCO Consultoría Colombia, por confiar en mis capacidades y brindarme la oportunidad de ser partícipe de su familia, a su vez también quiero agradecer a el docente Ilich Villamizar y a Enith Murcia, por su colaboración durante la elaboración de este trabajo, quienes con su dirección, conocimiento y sabiduría me permitieron el desarrollar este trabajo de la mejor manera posible.

Tabla de Contenidos

1	Agradecimientos	3
2	Resumen	6
3	Introducción.....	8
4	Objetivos.....	9
4.1	Objetivo general	9
4.2	Objetivos específicos.....	9
5	Generalidades	10
6	Marco Geológico	11
6.1	Geología Regional.....	11
6.1.1	Unidades de Suelos y Depósitos de tipo aluvial y lagunar	11
7	Marco Teórico	14
7.1	Balance Hídrico de Suelos	14
7.1.1	Fracción de lluvia interceptada por el follaje.	14
7.1.2	Infiltración	15
7.1.3	Cálculo de infiltración pluvial mensual (Pi).	16
7.1.4	Escorrentía Superficial	16
7.1.5	Balance de suelo.....	17
7.1.6	Evapotranspiración.....	17
7.1.7	Recarga del acuífero.....	19
7.2	Hidrogeología.....	22
7.2.1	Parámetros Hidrogeológicos	22
7.2.2	Gradiente Hidráulico	22
7.2.3	Conductividad Hidráulica	23
7.2.4	Porosidad Efectiva.....	24
7.2.5	Velocidad del flujo	25
7.3	Vulnerabilidad del Acuífero.....	25
7.3.1	Método GOD.....	25
8	Metodología.....	27
8.1	Etapa 1: Recopilación bibliográfica	27
8.2	Etapa 2: Etapa de campo	28
8.3	Etapa 3: Desarrollo y Procesamiento de la información	29
8.4	Etapa 4. Etapa de análisis e interpretación	30

8.5	Etapa 5. Trabajo final	31
9	Resultados y discusión.....	32
9.1	Balance Hídrico de suelos	32
9.2	Análisis de los Resultados.....	36
9.3	Análisis Hidrogeológico.....	41
9.3.1	Parámetros Hidrogeológicos	41
9.4	Vulnerabilidad del acuífero	45
10	Conclusiones y recomendaciones	47
11	Lista de referencias	49
12	Anexos	50

Lista de figuras

Figura 1.	Mapa de ubicación espacial de los pozos perforados a lo largo del área de estudio. Fuente: Autor	10
Figura 2.	Mapa Geológico de Bogotá. Fuente: SDA, (2012).....	13
Figura 3.	Componentes del coeficiente de infiltración. Fuente: Schosinsky, (2006).	16
Figura 4.	Punto de marchitez permanente y capacidad de campo en porcentaje por peso de suelo seco de diferentes texturas de suelos. Fuente: Schosinsky, (2006).....	17
Figura 5.	Mapa de isopiezas con indicaciones de zonas de máximo y mínimo gradiente. Fuente: García & Fernández, (2013).	23
Figura 6.	Esquema Conceptual Método GOD. Fuente: Foster et al, (2012)	26
Figura 7.	Descripción litológica de los testigos de perforación. Fuente: Autor	28
Figura 8.	Realización de las pruebas Slug. Fuente: Autor	29
Figura 9.	Recarga Potencial de las estaciones hidrometeorológicas estudiadas en la ciudad de Bogotá. Fuente: Autor.....	35

Índice de Tablas

Tabla 1.	Ejemplo de datos descartados por falta de información. Fuente: autor.	30
Tabla 2.	Resumen de los datos precipitaciones y temperaturas medias mensuales. Fuente: Autor	33
Tabla 3.	Resumen de los resultados obtenidos para la evapotranspiración en cada estación. Fuente: Autor	34

Acrónimos

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
RMCAB: Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá
SGC: Servicio Geológico Colombiano
SDA: Secretaria Distrital de Ambiente

2 Resumen

En el presente trabajo se realizó una caracterización hidrogeológica de los acuíferos presentes en dos localidades de la sabana de Bogotá, debido a la necesidad de mejorar la precisión y eficiencia de los estudios ambientales realizados por la empresa, ya que esto le permitiría evaluar con un mayor detalle, los riesgos ambientales asociados a la actividad humana presentes en el área, mejorar la selección de sitios de muestreo para la realización de perforaciones, el diseño de los planes de monitoreo ambiental, etc.

Para la realización de esta caracterización en términos generales se realizó un balance hídrico del suelo en estaciones hidrometeorológicas, mediante una serie de procedimientos en su mayoría matemáticos, en donde se estimó la recarga potencial de los acuíferos. Para complementar esta caracterización, se utilizó a su vez el método GOD (Geology, Overlying vadose zone, Depth to water), el cual es un modelo de vulnerabilidad multiplicativo, que toma en cuenta las variables de profundidad del agua (tope), substrato litológico y nivel de confinamiento del acuífero. busca establecer la capacidad de atenuación de contaminantes por eliminación, retardación y dilución, para cargas impuestas en la superficie. En base a esta caracterización se encontró un déficit de agua en 3 de las 7 estaciones analizadas, una vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos moderada de manera general junto con un componente bajo en algunos puntos y unos parámetros hidrogeológicos que van acorde con formaciones hidrogeológicas de bajo rendimiento, cuya permeabilidad suele considerarse baja a muy baja, debido al predominio de las texturas finas y de una topografía predominante plana.

Gracias a esta caracterización, identificamos el alcance de los mapas de isopiezas, debido a que la importancia de los parámetros hidrogeológicos que se pueden estimar mediante estas

fuentes, nos proporciona una visión detallada de cómo es el funcionamiento hídrico de estos medios, proporcionando los datos necesarios para evaluar cómo las actividades humanas, pueden afectar el acuífero y el entorno hidrogeológico en el que se encuentra mediante datos como la dirección del flujo, el gradiente hidráulico y en base a estos las velocidades de flujo, etc., permitiendo de esta manera a la empresa tomar decisiones informadas para prevenir impactos negativos en el medio ambiente y diseñar soluciones efectivas a los problemas relacionados a la contaminación de las aguas subterráneas.

Palabras Clave: Isopiezas, Vulnerabilidad, Acuífero, Parámetros Hidrogeológicos, Recarga potencial.

3 Introducción

En un mundo en donde la sostenibilidad y la conservación de las aguas es tan importante, la necesidad de mejorar la precisión y eficiencia de los estudios ambientales es fundamental. Las decisiones basadas en datos precisos y de calidad en los estudios ambientales tienen un valor agregado en este objetivo. Bajo esta premisa y basándonos en otros estudios, este trabajo tiene una relación directa con algunas otras investigaciones realizadas bajo esta temática en el ámbito de la hidrogeología, como el estudio realizado por Guamán (2017) en su trabajo de grado para la caracterización hidrogeológica en la primera línea del metro de Quito o el informe de la actualización del modelo hidrogeológico conceptual del acuífero subsuperficial de Bogotá, realizado por la universidad javeriana y la Secretaria distrital de ambiente de Bogotá (Secretaria distrital de ambiente, 2017), que, aunque se realizó bajo una escala completamente diferente, ambos nos dan un conocimiento de los procesos hidráulicos que tienen lugar en los acuíferos de Bogotá, y de esta manera brindar información sobre la dinámica de estos mismos, para que así se puedan tomar mejores decisiones al momento de evaluar estas fuentes hídricas y su medio hidrogeológico.

La caracterización hidrogeológica realizada en este trabajo, permite conocer la dinámica de los flujos subsuperficiales de dos localidades de la sabana de Bogotá (Figura 1) mediante el uso de tecnología de medición avanzada, datos geoespaciales de niveles freáticos y enfoques metodológicos innovadores propuestos por diferentes autores, los cuales nos permiten optimizar la recopilación y el análisis de datos relacionados con la hidrogeología, como lo es la realización de un balance hídrico de suelos. De esta manera, la metodología utilizada en la realización de este trabajo, consigue desarrollar cada uno de los objetivos planteados o propuestos en el mismo.

4 Objetivos

4.1 Objetivo general

Caracterizar hidrogeológicamente los acuíferos subsuperficiales de dos localidades de la Sabana de Bogotá y evaluar sus parámetros hidrogeológicos, Recarga Potencial y Vulnerabilidad a la Contaminación.

4.2 Objetivos específicos

- Identificar los parámetros hidrogeológicos relevantes en los acuíferos subsuperficiales, y demostrar la importancia del uso de mapas de isopiezas al momento de diagnosticar propiedades del comportamiento del agua subterránea de un acuífero.
- Determinar la recarga potencial de los acuíferos subsuperficiales mediante balances hídricos del suelo.
- Diagnosticar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación.
- Contribuir a la toma de decisiones informada en los estudios ambientales de contaminación tanto hídrica como en suelos, mediante una caracterización detallada de la dinámica del flujo de los acuíferos.

5 Generalidades

Bogotá se encuentra en las coordenadas $4^{\circ}35'56''\text{N}$, $74^{\circ}04'51''\text{O}$, en la Cordillera Oriental, en la zona septentrional de los Andes. La ciudad se encuentra ubicada en la sabana de Bogotá, en el altiplano cundiboyacense, la cual es una formación montañosa ubicada en la cordillera oriental de los Andes. Esta se asienta en lo que antiguamente fue un lago y está dividida en 20 localidades o distritos (Hernández, 2012).

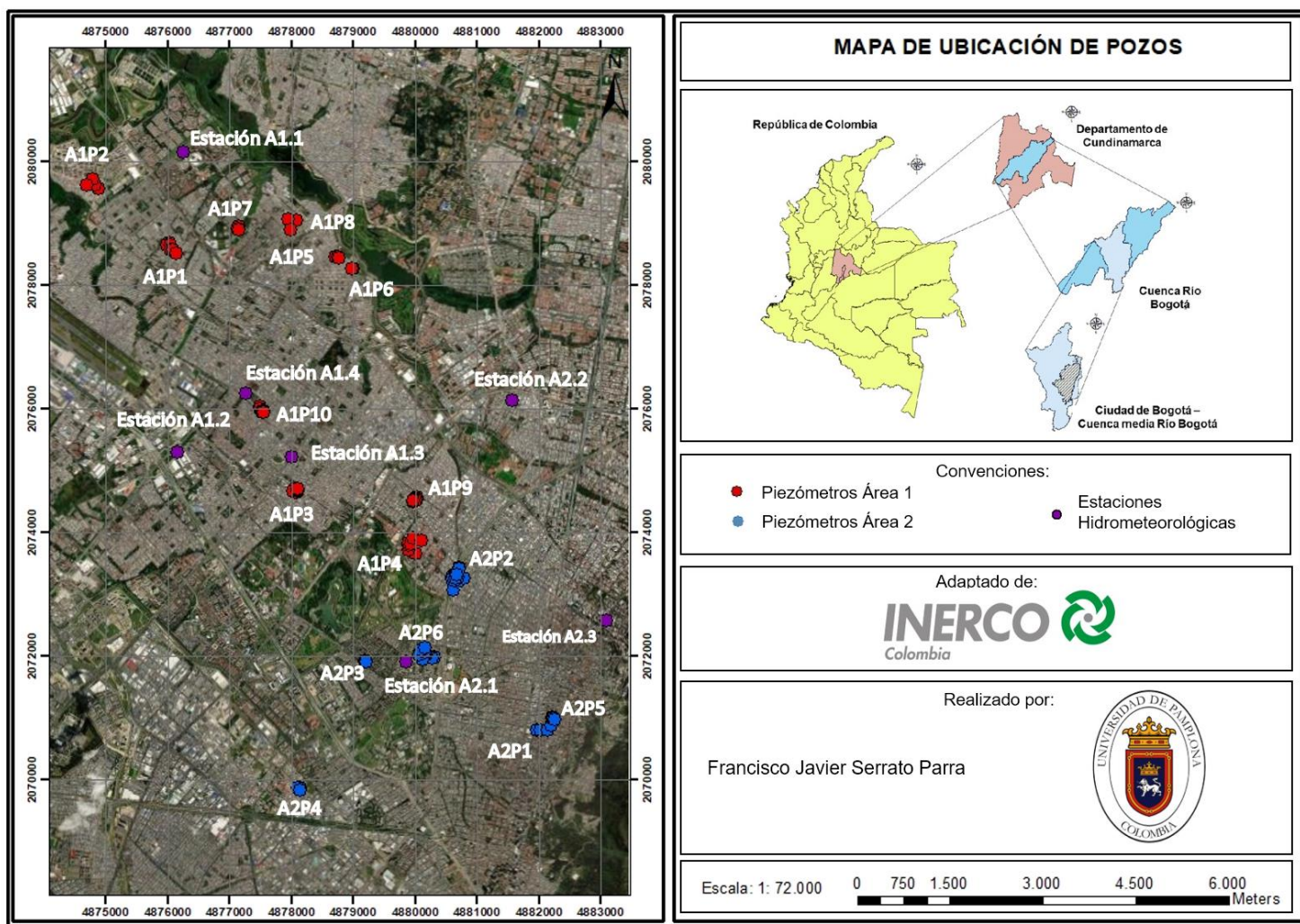


Figura 1, Mapa de ubicación espacial de los pozos perforados a lo largo del área de estudio. Fuente: Autor

6 Marco Geológico

A continuación, se describirán las principales unidades geológicas presentes en las dos localidades estudiadas en la sabana de Bogotá:

6.1 Geología Regional

Regionalmente la zona de estudio se encuentra caracterizada por la presencia de:

6.1.1 Unidades de Suelos y Depósitos de tipo aluvial y lagunar

Dentro de este grupo se presentan depósitos relacionados con el relleno de la Sabana de Bogotá mediante la acumulación de sedimentos por ríos y lagunas, los cuales han estado presente en los estudios de la empresa; se diferencian las siguientes formaciones Subachoque, Sabana y Chía (Montoya & Reyes, 2005).

6.1.1.1 Formación Sabana (Qsa).

Se denomina formación Sabana a los depósitos lacustrinos que afloran en toda la zona plana y que hace parte de la Sabana de Bogotá. Esta formación está constituida principalmente por principalmente por arcillas de color gris con algunas intercalaciones hacia la parte media de arenas finas. Localmente los dos metros superiores presentan un complejo de suelos constituidos por cenizas volcánicas. Este depósito es el resultado de la acumulación de sedimentos finos en un antiguo lago, con fluctuaciones en el nivel de agua: principalmente arcillas lacustres (Qsa1), y hacia los bordes de esta cuenca sedimentaria arcillas orgánicas, turbas, arcillas arenosas y arenas (arcillosas) intercaladas (Qsa2), (Montoya & Reyes, 2005).

Esta formación tiene por lo menos 320 m, está constituido por sedimentos finos y en los dos metros superiores son suelos constituidos por cenizas volcánicas; en general son arcillolitas

grises con locales intercalaciones de arenas finas y niveles delgados de gravas y turbas (Montoya & Reyes, 2005).

Esta formación se encuentra suprayaciendo los sedimentos de la Formación Subachoque y por datos de huellas de fisión, Carbono 14, se indica que esta formación presenta una edad del Pleistoceno medio y tardío (Montoya & Reyes, 2005).

6.1.1.2 Formación Chía (Qch).

La formación Chía son depósitos constituidos por sedimentos fluviales de grano fino que afloran a lo largo de los ríos principales que generalmente están por debajo de las llanuras de inundación de los ríos, constituidos por arcillas de inundación, en ocasiones moteadas grises y naranja y en áreas fangosas, arcillas orgánicas/diatomíticas (Qch1). Localmente pueden contener limos fluviales (Qch2). Conforman una cobertura delgada de limos fluviales sobre gravas de la formación Tunjuelo (Qch3). Pueden interpretarse como arcillas de inundación y localmente pueden tener origen coluvial-fluvial. El espesor máximo es de 5 m, (Montoya & Reyes, 2005).

Según diferentes autores, estos depósitos forman terrazas fluviales por erosión, son planas, de suave pendiente y son talladas por la acción de las corrientes fluviales actuales. La formación Chía suprayace sedimentos de la formación Río Tunjuelito o formación Sabana y los datos de las dataciones por Carbono 14, arrojan edades desde el holoceno hasta los 16.000 años (Montoya & Reyes, 2005).

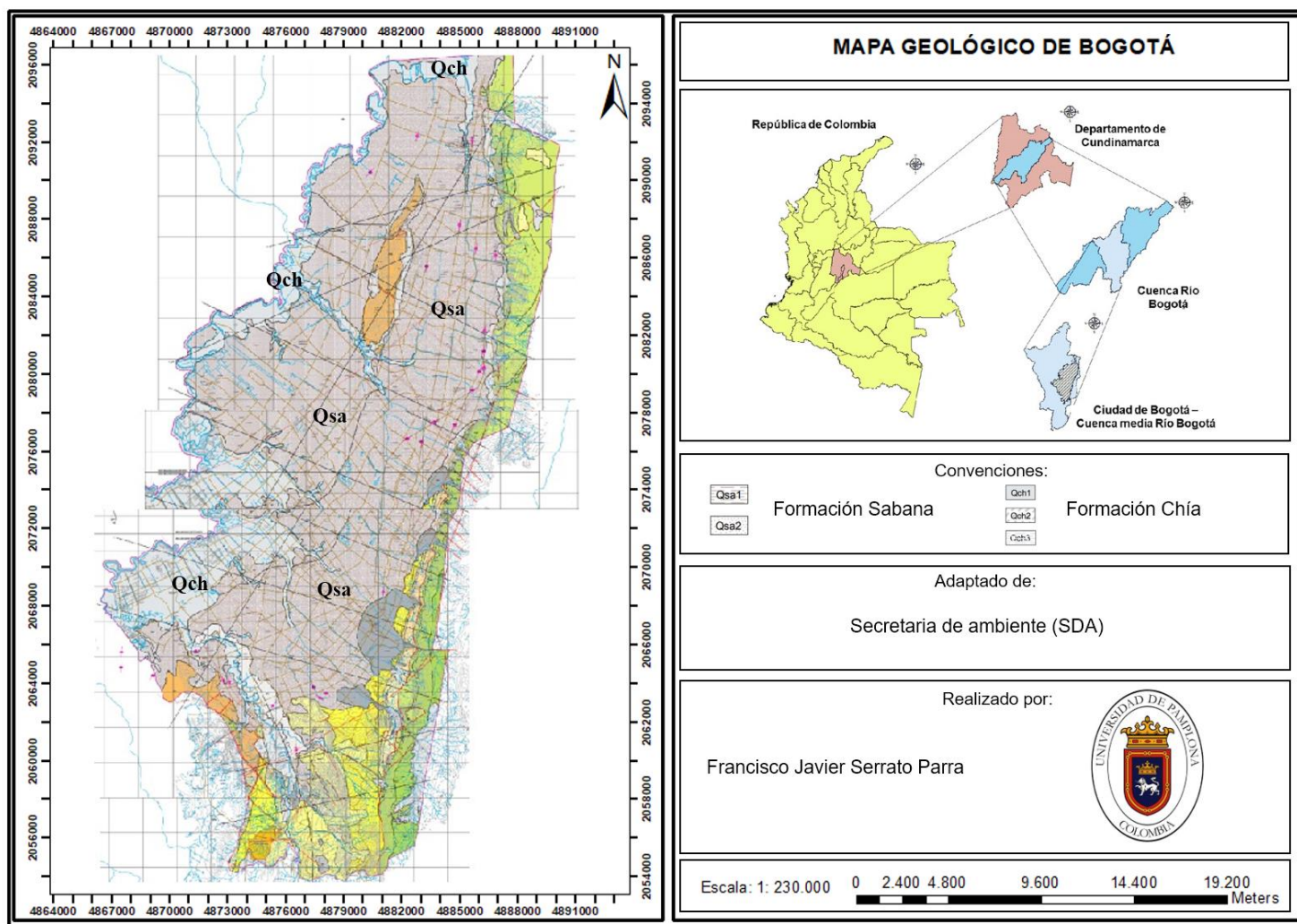


Figura 2. Mapa Geológico de Bogotá. Fuente: SDA, (2012).

7 Marco Teórico

7.1 Balance Hídrico de Suelos

Cuando se estudia el equilibrio del agua en el suelo, se utiliza principalmente el principio de la conservación de la materia, debido a que, el agua que ingresa al suelo es igual al agua almacenada en el mismo más el agua que sale. La entrada se da por la absorción de agua en el suelo (infiltración) y la salida del mismo se da en función de la evapotranspiración. Para poder determinar la recarga de un acuífero se deben conocer distintos parámetros, entre los que están la infiltración, la cantidad de esta misma que es interceptada por el follaje y un balance de suelos que nos permita estimar el agua que drena desde el suelo hacia el acuífero (Schosinsky, 2006).

7.1.1 *Fracción de lluvia interceptada por el follaje.*

Teniendo en cuenta lo dicho por (Schosinsky, 2006) las lluvias menores de 5 mm mensuales, no van a generar infiltración ya que se considera que, en un mes con lluvia, al menos 5mm son retenidos por el follaje sin llegar al suelo. Para poder determinar la fracción de lluvia interceptada por el follaje, utilizaremos un coeficiente de follaje (Cfo) el cual está definido como el porcentaje de la lluvia mensual que es retenida en el follaje, expresado en tanto por uno. Para nuestro caso de acción, este valor vendría siendo: $Cfo = 0.12$ (Adimensional).

Para calcular la retención de la lluvia mensual interceptada por el follaje (Ret), se aplicarán las siguientes condicionales:

Si P es menor o igual a 5 mm/mes, $Ret = P$

Si el producto $(P)(Cfo)$ es mayor o igual de 5 mm/mes, $Ret = (P)(Cfo)$

Si P es mayor de 5 mm/mes y el producto $(P)(Cfo)$ menor de 5, $Ret = 5$.

Donde:

P: Precipitación mensual del mes [mm/mes].

Ret: Retención de lluvia en el follaje [mm/mes].

Cfo: Coeficiente de retención del follaje.

7.1.2 Infiltración

Uno de los factores que más influyen en la infiltración de la lluvia en el suelo, es la fracción que infiltra por textura del suelo (K_{fc}), que está dado tentativamente por los siguientes condicionales (Schosinsky, 2006):

Si f_c se encuentra entre 16 y 1568 mm/día $K_{fc} = 0.267 \ln(f_c) - 0.000154 \cdot f_c - 0.723$
 Si f_c es menor a 16 mm/día $K_{fc} = 0.0148 f_c / 16$
 Si f_c es mayor de 1568 mm/día $K_{fc} = 1$

Donde:

K_{fc} : Coeficiente de infiltración (fracción que infiltra por textura del suelo)

f_c : Infiltración básica obtenida del instructivo (R014) propuesto por Prosap (s.f.).

Ademas de la fracción de agua que infiltra por textura del suelo (K_{fc}), existen otros parámetros que influyen en la infiltración de la lluvia en el suelo, estos son la pendiente del terreno y la vegetación. Estos coeficientes vienen a conformar el coeficiente de infiltración del suelo (C_i), basado en los siguientes condicionales encontrados en Schosinsky (2006).

Si $K_p + K_v + K_{fc}$ es mayor de 1, entonces $C_i = 1$
 Si $K_p + K_v + K_{fc}$ es menor de 1, entonces $C_i = K_p + K_v + K_{fc}$

Donde:

C_i = Coeficiente de infiltración [adimensional].

K_p = Fracción que infiltra por efecto de pendiente [adimensional].

K_v = Fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal [adimensional].

K_{fc} = Fracción que infiltra por textura del suelo [adimensional].

El coeficiente de infiltración es el factor por el cual hay que multiplicar la precipitación mensual para obtener el agua que se infiltra mensualmente hacia el suelo. En una zona dada, entre menor sea la pendiente del terreno y mayor sea su cobertura vegetal, la velocidad de escurrimiento se retrasa, generando una mayor infiltración. Los valores sugeridos de estos componentes, que conforman el coeficiente de infiltración, se muestran en la figura 3.

7.1.3 Cálculo de infiltración pluvial mensual (P_i).

En el cálculo de la precipitación que infiltra mensualmente, se han de considerar los siguientes factores: la precipitación mensual, la retención pluvial mensual en el follaje y el coeficiente de infiltración (Schosinsky, 2006).

El cálculo de la precipitación que infiltra mensualmente (P_i) al suelo, está dado por la siguiente ecuación:

$$P_i = (C_i)(P - \text{Ret}). \quad (1)$$

Donde:

P_i = Precipitación que infiltra mensualmente al suelo en [mm/mes].

C_i = Coeficiente de infiltración [adimensional]

P = Precipitación mensual en [mm/mes] (dato meteorológico).

Ret = Retención de lluvia mensual por follaje en [mm/mes].

En ningún caso el coeficiente de infiltración (C_i) ha de ser mayor de 1, si así fuese, se le asigna a C_i el valor de 1.

Por pendiente:	Pendiente	K_p
Muy plana	0,02%-0,06%	0,30
Plana	0,3%-0,4%	0,20
Algo plana	1%-2%	0,15
Promedio	2%-7%	0,10
Fuerte	mayor de 7%	0,06

Por cobertura vegetal:	K_v
Cobertura con zacate menos del 50%	0,09
Terrenos cultivados	0,10
Cobertura con pastizal	0,18
Bosques	0,20
Cobertura con zacate más del 75%	0,21

Figura 3. Componentes del coeficiente de infiltración. Fuente: Schosinsky, (2006).

7.1.4 Escorrentía Superficial

La escorrentía superficial generada por la lluvia mensual, corresponde a la precipitación mensual menos la retención de lluvia en el follaje menos la infiltración (2). La escorrentía mensual se calcula con la siguiente ecuación:

$$ESC = P - Ret - Pi. \quad (2)$$

Donde:

ESC = Escorrentía superficial [mm/mes].

P = Precipitación [mm/mes]. (dato meteorológico).

Ret = Retención de lluvia mensual por follaje [mm/mes].

Pi = Precipitación que infiltra mensualmente al suelo [mm/mes].

7.1.5 Balance de suelo

Con el fin de poder realizar un balance de suelos se deben tener en cuenta diferentes parámetros, el primero vendría siendo la infiltración mensual de la lluvia hacia el suelo, el segundo sería la capacidad de campo, el punto de marchitez, los cuales se estimarán mediante parámetros teóricos, como los presentados en la figura 4 y por último la profundidad aproximada de las raíces que extraen el agua presente en el medio.

TEXTURA DEL SUELO	Porcentaje por peso de suelo seco		
	PMP%	CC%	Densidad aparente (g/cm ³)
Arenoso	2-6	6-12	1,55-1,80
Franco-arenoso	4-8	10-18	1,40-1,60
Franco	8-12	18-26	1,35-1,50
Franco- arcilloso	11-15	23-31	1,30-1,40
Arcillo-arenoso	13-17	27-31	1,25-1,35
Arcilloso	15-19	31-39	1,20-1,30

Figura 4. Punto de marchitez permanente y capacidad de campo en porcentaje por peso de suelo seco de diferentes texturas de suelos. Fuente: Schosinsky, (2006).

7.1.6 Evapotranspiración

Para el cálculo de este parámetro se utilizará la metodología recomendada por Thornthwaite, la cual está avalada para su uso en Colombia por Gómez & Cadena (2017), en donde separa la evapotranspiración en dos parámetros de la siguiente manera:

Evapotranspiración Potencial (ETP): Es la cantidad máxima de agua que puede evaporarse desde un suelo, por una capa de vegetación, continua y de corta altura, cuando es ilimita la cantidad de agua suministrada al suelo.

Evapotranspiración Real (ETr): Es la cantidad de agua perdida por el complejo planta-suelo en las condiciones meteorológicas, edafológicas y biológicas existentes.

Para realizar el cálculo de la Evapotranspiración por el método de Thronthwaite, se deben seguir los siguientes pasos (Sánchez, 2022).

1. Se calcula un “Índice de calor mensual” (i) a partir de la temperatura media mensual (t):

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514}. \quad (3)$$

2. Se calcula el Índice de calor anual (I) sumando los 12 valores de i :

$$I = \sum_{i=1}^{12} i. \quad (4)$$

3. Se calcula la ETP mensual “sin corregir” mediante la fórmula:

$$ETP_{Sin\ corregir} = 16 \left(\frac{10 * t}{I}\right)^a. \quad (5)$$

Donde:

t : Temperatura media mensual, °C

I : Índice de calor anual, obtenido en el punto 2.

a : $675 * 10^{-9}I^3 - 771 * 10^{-7}I^2 + 1791 * 10^{-5}I + 0.49239$

Se realiza una corrección para el n° de días del mes y el n° de horas de sol:

$$ETP = ETP_{Sin\ corregir} \frac{N}{12} \frac{d}{30} \cdot \quad (6)$$

Donde:

N: Número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y de la latitud del sitio

d: Número de días del mes

7.1.7 *Recarga del acuífero*

Se debe tener en cuenta, que para que un acuífero se pueda recargar debe pasar por varios procesos, primero que todo, el agua de lluvia (precipitación) debe llegar a infiltrarse y emplazarse en los poros del suelo, con esto presente el suelo podrá llegar a un estado de Capacidad de Campo (CC) el cual es el contenido de agua o humedad que un suelo es capaz de retener, al momento en el que la precipitación llega a su fin, ocurre un proceso denominado evapotranspiración, el cual es la pérdida de humedad que se da a medida que el suelo y otras superficies se secan. Cuando este proceso termina el agua restante que queda en suelo percola y recarga el acuífero (Schosinsky, 2006).

Con esto en mente, se debe tener en cuenta que se deben calcular diferentes parámetros para poder estimar la recarga potencial de un acuífero, empezando con que, al iniciar un mes x, el suelo presenta una humedad inicial (HSi), con la que podremos calcular diferentes coeficientes de humedad al final del mes (C1 y C2) dependiendo si estamos considerando que se dé la evapotranspiración o no.

$$C1 = (HSi - PM + Pi) / (CC - PM). \quad (7)$$

Donde:

C1: Coeficiente de humedad al final del mes, antes de que ocurra la evapotranspiración.
 HSi: Humedad al inicio del mes, ósea la humedad inicial del suelo [mm]
 PM: Punto de marchitez [mm]
 Pi: Precipitación que infiltra cada mes [mm]
 CC: Capacidad de campo [mm]

$$C2 = (Hsi - PM + Pi - ETR1) / (CC - PM). \quad (8)$$

Donde:

C2= Coeficiente de humedad al final del mes, después de que ocurra la evapotranspiración [Adimensional].

ETR1: Evapotranspiración potencial real [mm/mes], considerando la humedad correspondiente al coeficiente C1.

El promedio de estos coeficientes es el coeficiente de humedad del mes, por lo que la evapotranspiración real en un mes dado es:

$$ETPR \text{ (mm/mes)} = ((C1 + C2) / 2) ETP. \quad (9)$$

Donde:

ETPR: Evapotranspiración real tentativa promedio, en una zona, ocurrida durante el mes [mm/mes].

C1: Coeficiente de humedad máximo, sin considerar la evapotranspiración [Adimensional].

C2: Coeficiente de humedad mínimo, considerando evapotranspiración calculada con C1 [Adimensional].

Se debe tener en cuenta que ninguno de estos coeficientes de humedad, tanto C1 como C2, pueden ser superiores a 1, ni menores a 0. Si alguno de los dos es mayor a 1, se tomará el valor de 1 y si tienen un resultado negativo, se tomará el valor de 0.

Un parámetro muy importante para estimar la recarga potencial de un acuífero es la humedad disponible del suelo (HD), la cual es la humedad que pueden tomar las raíces de las plantas para poder evapotranspirar, está dada por la siguiente ecuación:

$$HD \text{ (mm/mes)} = Hsi + Pi - PM. \quad (10)$$

Donde:

HD: Humedad disponible [mm/mes].

Hsi: Humedad inicial del suelo al principio del mes [mm].

Pi: Precipitación que infiltra [mm/mes].

PM: Punto de marchitez [mm].

Por lo tanto, con este parámetro la ecuación para calcular la evapotranspiración real

(ETR) está dado por los siguientes condicionales:

Si $((C1+C2)/2)$ ETP es menor o igual a HD.

$$ETR \text{ [mm/mes]} = ((C1+C2)/2) \text{ ETP.} \quad (11)$$

Si $((C1+C2)/2)$ ETP es mayor que HD

$$ETR \text{ [mm/mes]} = HD. \quad (12)$$

Donde:

ETR: Evapotranspiración real promedio de la zona, ocurrida durante el mes [mm/mes].

C1: Coeficiente de humedad máximo, sin considerar evapotranspiración [Adimensional].

C2: Coeficiente de humedad mínimo considerando evapotranspiración calculada con C1 [Adimensional].

ETP: Evapotranspiración potencial [mm/mes].

HD: Humedad disponible [mm/mes].

Ahora como ultimo parámetro necesario para ya poder el calcular la recarga del acuífero,

Se debe conocer la humedad al final del mes (HSf). La cual hallaremos mediante los siguientes condicionales:

Si $(HD+PM-ETR)$ es menor que la capacidad de campo, $HSf=HD+PM-ETR$

Si $(HD+PM-ETR)$ es mayor o igual que la capacidad de campo, $HSf=CC$.

Se debe tener en cuenta que HSf no puede ser mayor a la capacidad de campo (CC).

Donde:

HSf: Humedad del suelo al final del mes [mm].

HD: Humedad disponible [mm/mes].

PM: Punto de marchitez [mm].

ETR: Evapotranspiración real [mm/mes].

CC: Capacidad de campo [mm].

Además del cálculo de la ecuación para la humedad del suelo al final del mes, es necesario la humedad de suelo al inicio de mes, o sea, humedad inicial (HSi). La humedad inicial de un mes dado es el siguiente:

HSi: Es igual a la humedad de suelo final del mes anterior.

Con todo esto, ya se puede calcular la recarga potencial del acuífero con la siguiente ecuación:

$$R_p = P_i + H_{Si} - H_{Sf} - ETR. \quad (13)$$

Donde:

R_p: Recarga potencial mensual [mm/mes].

P_i: Precipitación que infiltra [mm/mes].

H_{Sf}: Humedad del suelo al final del mes [mm].

ETR: Evapotranspiración real [mm/mes].

7.2 Hidrogeología

7.2.1 *Parámetros Hidrogeológicos*

Un mapa de isopiezas es un tipo de mapa topográfico que muestra las líneas de igual profundidad del nivel freático o piezométrico en un acuífero. Estas líneas permiten conocer la dirección y el sentido del flujo del agua subterránea, así como su gradiente hidráulico y de esta forma estimar otros parámetros (García & Fernández, 2013).

7.2.2 *Gradiente Hidráulico*

El gradiente hidráulico da idea de la pendiente de la superficie freática o piezométrica. Suele representarse por la letra “i”, y puede expresarse como la diferencia de potencial (h) entre los dos puntos considerados en [m], dividido entre la distancia que separa esos dos puntos medidos en línea recta (L) en [m];

$$i = (h_1 - h_2) / L. \quad (14)$$

Según esta expresión, las zonas de máximo gradiente serán aquellas que tengan las isopiezas más juntas, y las de menor gradiente las que tengan las isopiezas más separadas. Por lo general en acuíferos libres, zonas de bajo gradiente hidráulico son características de medios de alta permeabilidad (García & Fernández, 2013).

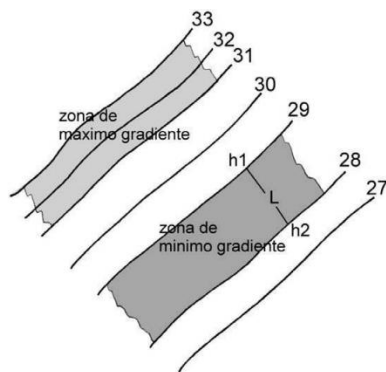


Figura 5. Mapa de isopiezas con indicaciones de zonas de máximo y mínimo gradiente.

Fuente: García & Fernández, (2013).

7.2.3 Conductividad Hidráulica

A continuación, se presentan los métodos matemáticos usados para la estimación de la conductividad hidráulica (K), (INERCO Consultoría Colombia, 2023).

7.2.3.1 Método de Hvorslev

Esta solución es utilizada para determinar la conductividad hidráulica (K) en acuíferos confinados y libres, donde los pozos pueden atravesar parcial o totalmente el tramo saturado. La expresión matemática que define el método es:

$$K = \frac{rc^2 * \ln\left(\frac{L}{R}\right)}{2 * L * t_L} \quad (15)$$

Donde:

K = Conductividad hidráulica. [m/día].

rc = Radio de la entubación o casing. [m].

L = Longitud del tramo filtrante. [m].

R = Radio del filtro de grava. [m].

t_L = Tiempo en el que aún perdura el 37% del ascenso o descenso inicial. Este dato surge debido a que $\ln \frac{1}{0,37} = 1$

7.2.3.2 Método de Bouwer & Rice

Dicha solución fue establecida para determinar la conductividad hidráulica (K) en acuíferos libres, principalmente, aunque posteriormente, Bouwer indicó que también puede ser implementado en acuíferos confinados y los pozos pueden penetrar parcial o totalmente el nivel saturado. La expresión matemática que define este método es:

$$K = \frac{r_c^2 * \ln\left(\frac{r_e}{r_f}\right)}{2 * L * t} * \ln\left(\frac{h_o}{h_t}\right). \quad (16)$$

Donde:

K = Conductividad hidráulica. [m/día].

r_c = Radio de la entubación o casing. [m].

L = Longitud del tramo filtrante. [m].

h_o = Distancia concerniente al ascenso o descenso máximo inicial. [m].

h_t = Distancia referente a un ascenso o descenso en un tiempo t. [m].

t = Tiempo en el cual se evalúa un ascenso o descenso determinado del nivel de agua [segundos].

R_e = Radio de influencia de la prueba. [m].

r_f = Radio del filtro de grava. [m].

L_w = Altura del nivel freático desde el límite inferior del acuífero. [m].

H = Espesor saturado del acuífero libre. [m].

No es posible determinar directamente R_e ; por lo tanto, el factor $\ln(r_e/r_f)$ se debe calcular a partir de las siguientes condiciones: i) $L_w = H$; o, ii) $L_w < H$. Al determinar esta equivalencia, cada condición se podrá calcular de forma manual, o, directamente en un programa que contenga el método para el análisis.

7.2.4 Porosidad Efectiva

La porosidad se define como el total de espacios vacíos presentes en un material sobre el volumen total. Para la estimación de este parámetro se utilizaron valores teóricos propuestos en

el libro de Hölting & Wilhelm (2009), los cuales están definidos en función de la litología que el medio presente.

7.2.5 *Velocidad del flujo*

La velocidad de flujo hace referencia a la velocidad lineal media de infiltración, la cual se determinará multiplicando K, conductividad hidráulica de las ecuaciones (16) y (15) por el gradiente hidráulico (14) y dividiendo por la porosidad efectiva de los sedimentos no consolidados de la siguiente manera (Weight, 2008).

$$V=(K*i) / ne. \quad (17)$$

Donde:

V= Velocidad del flujo [m/día].

K = Conductividad hidráulica. [m/día].

i= Gradiente hidráulico.

ne = Porosidad efectiva. [m/día].

7.3 **Vulnerabilidad del Acuífero**

Para este estudio se empleó un método paramétrico reconocido internacionalmente y ampliamente aplicado en diferentes escenarios conocido como la metodología GOD (Geology, Overlying vadose zone, Depth to water) (Figura 6). Dicho método se ha empleado para valorar la vulnerabilidad de la unidad hidrogeológica que se encuentra en la zona de interés.

7.3.1 *Método GOD*

Este método desarrollado por Foster *et al* (2012), se trata de un proceso sencillo y sistemático, usado para estimar el riesgo de contaminación de un acuífero de forma aproximada. Este es un método que brinda información rápida y con buen ajuste a las condiciones del terreno. El método se basa en la asignación de pesos entre 0 y 1, involucrando tres variables, que corresponden a:

- Ground water occurrence (G): se refiere al tipo de acuífero y su confinamiento, cuya información es obtenida a partir de las perforaciones realizadas en la zona de estudio y a las medidas realizadas sobre los puntos habilitados como piezómetros.
- Overall aquifer class (O): litología de la zona no saturada, cuya información se obtiene a partir de las perforaciones realizadas en la zona de estudio.
- Depth to groundwater (D): profundidad del agua subterránea (tope), obtenida de las medidas de la profundidad de los niveles freáticos o piezométricos, en los pozos instalados.

Las tres variables se multiplican y se obtiene una valoración de la sensibilidad a la contaminación, cuyo rango se encuentra entre 0 (despreciable) y 1 (extrema).

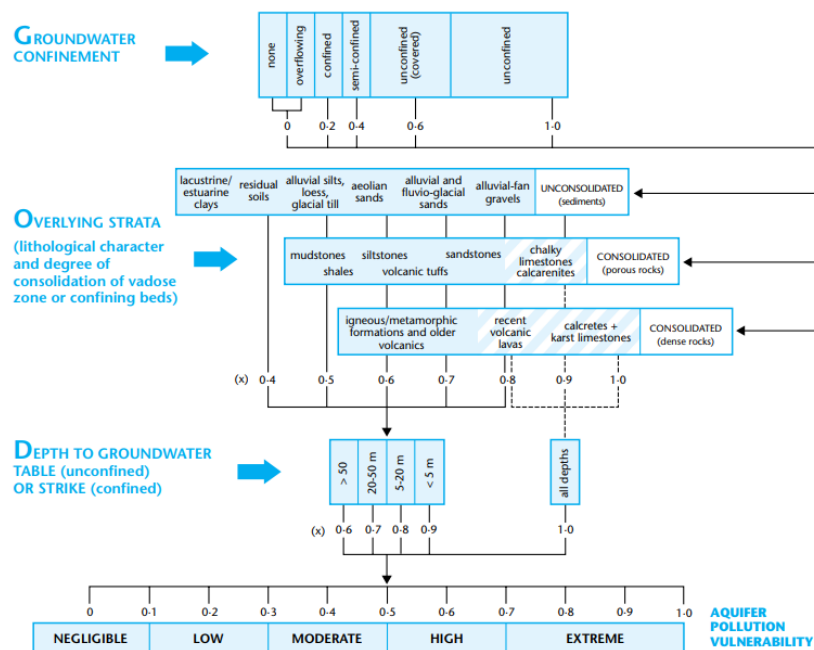


Figura 6. Esquema Conceptual Método GOD. Fuente: Foster et al, (2012)

8 Metodología

El presente trabajo tiene como finalidad caracterizar hidrogeológicamente las áreas que han sido estudiadas por la empresa INERCO, al determinar diferentes parámetros hidrogeológicos, evaluar la posible recarga de estas áreas y evaluar la vulnerabilidad que presentan estos medios hidrogeológicos a la contaminación, esto se realizará siguiendo las etapas metodológicas presentadas a continuación:

8.1 Etapa 1: Recopilación bibliográfica

En esta etapa se realiza una recopilación de información sobre los proyectos realizados en la sabana de Bogotá, que reposan en expedientes de la secretaria Distrital de Ambiente o en la misma empresa. Los datos a recopilar serán procedentes de informes de evaluación ambiental y se recolectará la información de campo como lo es la litología del área, entre otros. A su vez se obtendrá información procedente de medios públicos como el IDEAM, RMCAB, SGC, entre otros referentes teóricos. Se debe resaltar que estos documentos serán clasificados de acuerdo a su necesidad para la realización de este proyecto y que la mayoría de la información necesaria será la obtenida en fuentes de información secundaria y la que pueda ser suministrada por la empresa. La información recopilada de las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM y el RMCAB, será recopilada de puntos tanto dentro como por fuera de las áreas estudiadas (Figura 1) siempre y cuando sean lo suficientemente cercanas como para que su influencia tenga participación en estas, es decir, que el radio de lectura de la estación abarque parte del área estudiada.

8.2 Etapa 2: Etapa de campo

La etapa dos corresponde a la recolección de la información primaria con el fin de complementar la información sacada de la etapa 1; en esta se realizará la medición de los niveles freáticos en distintos puntos de la sabana de Bogotá para los que se obtengan los permisos, dentro de las localidades estudiadas o las extraídas de los expedientes de información secundaria consultada. El primer paso a realizar durante la etapa de campo es la de las descripciones de los testigos de perforación (Figura 7) realizados para los proyectos aún vigentes y de los que se pueda ser participe.



Figura 7. Descripción litológica de los testigos de perforación. Fuente: Autor

Posteriormente a esto y la construcción del piezómetro se realizan las pruebas Slug (Figura 8), las cuales se basan en la medida de la recuperación del nivel del agua después de un cambio instantáneo en el mismo. Este cambio en el nivel del agua se realiza provocando un repentino descenso o ascenso del nivel piezométrico, que se recupera hasta las condiciones iniciales., en donde como primer paso se proceda a realizar la medición de los niveles freáticos iniciales, la cual será utilizada como referencia para evaluar los cambios posteriores en el nivel

de agua, esto se realiza mediante una sonda o hidronivel, el cual posee un electrodo que envía un aviso en el momento del contacto con el agua, posteriormente a esto se introduce el Levellogger, el cual es el instrumento utilizado para medir los cambios en la columna de agua y seguidamente a esto se introduce una perturbación en el nivel de agua dentro del pozo. Esto se hace típicamente agregando o retirando una columna de agua conocida en el pozo mediante un lingote o un bailer. Con esto, el Levellogger empieza a registrar continuamente en intervalos regulares de tiempo el nivel de agua en el pozo a medida que el sistema se restablece al equilibrio. Por último, mediante el Software Aquifer Test, se determina la conductividad hidráulica.



Figura 8. Realización de las pruebas Slug. Fuente: Autor

8.3 Etapa 3: Desarrollo y Procesamiento de la información

Con las etapas de recolección de información y de campo, tenemos todos los datos necesarios para la realización de este trabajo, se empieza el proceso de limpieza de datos, en donde se cogerán y discriminarán todas las estaciones que no presenten datos completos de

temperatura y precipitación promedio o que no reporte valores cuantificables en determinados meses, impidiendo así realizar una correcta ponderación de los resultados para cada mes, como la que se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Ejemplo de datos descartados por falta de información. Fuente: autor.

TEMP PROMEDIO ESTACIÓN X												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
MIN	3,18											
MAX	20,31											
PROMEDIO	11,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Posterior esto, y con la información ya seleccionada y recolectada de la misma, se procede a la elaboración de las diferentes salidas como lo son los mapas de isopiezas, los cuadros de los cálculos para la evaluación de la recarga potencial de los acuíferos y el análisis para determinar el nivel de vulnerabilidad que presentan estos acuíferos a la contaminación, los cuales se presentan en detalle en el apartado de Anexos.

8.4 Etapa 4. Etapa de análisis e interpretación

Una vez acabada la etapa de desarrollo, con en base a los mapas de isopiezas y todos los cálculos realizados, se procederá a realizar la respectiva interpretación de estos, como lo son los parámetros hidrogeológicos que se extraerán del mapa de isopiezas y los demás parámetros que serán determinados gracias a estos, como lo es la velocidad del flujo de agua en la zona, a su vez se evaluarán los valores arrojados con respecto a la posible recarga de estos acuíferos y se darán explicaciones de estos mismos en base a las características de cada área y de esta manera poder realizar la caracterización hidrogeológica propuesta para este trabajo.

Empezando por la obtención de los parámetros hidrogeológicos de los mapas de isopiezas, se debe entender que estos muestran líneas que conectan puntos con el mismo valor hidráulico por lo que cada línea representa un nivel de agua o presión específico en el acuífero

subterráneo en un momento dado. La dirección de flujo no es un parámetro difícil de estimar debido a que se obtiene al observar la orientación de las líneas de isopiezas en el mapa además de que esta generalmente va desde áreas de mayor elevación hidráulica (isopiezas más altas) hacia áreas de menor elevación hidráulica (isopiezas más bajas). Seguido a esto, el procedimiento para calcular el gradiente hidráulico, consiste en determinar la diferencia de elevación (en metros) entre dos isopiezas cercanas y la distancia horizontal entre ellas. La teoría dicta que cuanto más cerca estén las líneas, mayor será el gradiente hidráulico en esa área, se debe tener en cuenta que esto es muy subjetivo debido a que esto va en función de la escala del mapa, así que al momento de determinar el gradiente hidráulico se deberá hacer hincapié y tener extremo cuidado con el diferencial de nivel freático entre cada punto sin importar la cercanía que presenten estos. El resto de parámetros hidrogeológicos simplemente vienen a ser determinados por una serie de cálculos y estimaciones teóricas, explicadas en el capítulo del Marco Teórico.

8.5 Etapa 5. Trabajo final

Se redactará el trabajo final para dar a conocer los resultados de este mismo a la empresa y a la Universidad de Pamplona. Cabe resaltar que, como medida de seguridad de los datos entregados por la empresa, las ubicaciones reales de los datos serán reemplazadas y se postrarán sobre una región “Hipotética” distinta a la real, con el fin de proteger la confidencialidad de estos informes.

9 Resultados y discusión.

A lo largo de la zona de estudio se han perforado en total ciento y un (101) pozos a cargo de la empresa INERCO, de los cuales cabe destacar que presentan características diferentes en cuanto diseño (Profundidad, diámetro, etc.). Por temas de confidencialidad con la empresa, las ubicaciones reales de estas perforaciones han sido omitidas y en su lugar se realizó una modificación y un traslado de estas a una zona distinta a la original, cambiando consigo sus coordenadas en los mapas.

9.1 Balance Hídrico de suelos

El proceso del cálculo del balance hídrico de suelos en la zona de estudio, consistió en utilizar los datos de precipitación y temperatura, pertenecientes a las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM y el RMCAB. De cada estación se extrajeron datos de temperatura media mensual y precipitación media mensual como se muestra en la Tabla 2. Para tener una mejor interpretación y caracterización del sistema hidrogeológico del área, se realizó este balance hídrico de suelos en estaciones ubicadas tanto dentro como afuera de la zona de estudio. Al final quedaron distribuidas 4 estaciones hidrometeorológicas para el área 1 y 3 para el área 2 (Figura 1), cada área mencionada anteriormente (Área 1 y Área2) corresponden a una de las localidades en donde se ejecutó esta caracterización (Figura 1), la razón por la que no se nombran estas localidades y en cambio se le atribuyeron otros nombres (Área 1 y Área 2) es por los términos y condiciones de confidencialidad que presenta la empresa.

Con esto dicho, se utilizaron solamente 7 estaciones hidrometeorológicas a pesar de la presencia de más en el área de estudio. Esto se debió a la falta de información que estas presentan, haciendo imposible la realización de los cálculos necesarios para este trabajo. Se utilizarán datos

de un periodo de 20 años (2003 – 2023) para poder así tener cubierto los datos necesarios para realizar la ponderación en cada mes del año, debido a la falta de información por año que se encuentra en estas.

Tabla 2. Resumen de los datos precipitaciones y temperaturas medias mensuales. Fuente: Autor

Código	ENE		FEB		MAR		ABR		MAY		JUN		JUL		AGO		SEP		OCT		NOV		DIC		PROM ANUAL	PROM ANUAL
	(mm)	(C°)	(mm)	(C°)	(mm)	(C°)	(mm)	(C°)	(mm)	(C°)	(mm)	(C°)	(mm)	(C°)	(mm)	(C°)	(mm)	(C°)	(mm)	(C°)	(mm)	(C°)	(mm)	(C°)	(mm)	(C°)
Estación A2.1	28,4	14,4	42	14,4	74,66	14,4	80,3	14,5	59,8	14,5	29,8	14,3	30	14,1	44,3	14,3	33,6	14,3	86,37	14,3	89,24	14,4	41,24	14,3	53,30	14,35
Estación A2.2	57	14,7	69	15,1	125,7	15,3	150	15,4	146	15,5	83,5	15	52	14,7	57,2	14,6	58,7	14,6	137,4	14,6	159,3	15,2	88,62	14,7	98,69	14,93
Estación A2.3	62,7	14,7	86,1	14,8	122,7	15,3	127,4	15,4	93,5	15,2	54,2	15,1	40,3	14,6	33,4	14,8	68,1	14,6	125	14,8	214,4	14,9	109,5	14,7	94,78	14,90
Estación A1.1	28,6	14	84,6	14,3	106,9	14,1	140,7	14,1	137	14,4	78,5	14,3	57,7	13,8	43,3	14	64,9	14,2	117,7	14,3	142,6	14,2	86,32	13,9	90,75	14,14
Estación A1.2	21,6	13,5	28,4	13,6	75,9	14,3	126,3	14,6	108	14,8	63,3	14,1	42,7	14,1	41,3	14	48,2	14	116,2	14,4	94,25	14,2	37,94	13,9	67,04	14,12
Estación A1.3	18,6	14,9	35,5	15,5	73,6	16,1	111,7	15,7	99,8	15,6	55,9	15,3	53,9	14,5	40,2	14,8	33,9	15,1	88,66	15,2	101,7	15,2	49,6	14,9	63,58	15,23
Estación A1.4	28,3	14,4	42	14,5	74,66	14,6	80,3	14,6	59,8	14,6	29,8	14,4	30,1	14,3	44,3	14,3	33,6	14,4	86,37	14,4	89,24	14,4	41,24	14,4	53,30	14,45

Un parámetro muy importante para la realización de este balance es la evapotranspiración potencial, el cual fue determinado por el método de Thornthwaite mediante las ecuaciones (3), (4), (5) y (6), este cálculo se base en la utilización de parámetros como la latitud del área de estudio, las horas de luz solar promedio de los días de cada mes, entre otros. Dicho esto, los resultados arrojados para este variable se muestran a continuación en la Tabla 3. Los cálculos completos son mostrados en el Anexo A.

*Tabla 3. Resumen de los resultados obtenidos para la evapotranspiración en cada estación.
Fuente: Autor*

EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL													
CODIGO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Estación A2.1	57,48	54,46	58,84	57,88	60,44	57,89	58,61	58,96	56,71	59,28	56,34	57,25	694,14
Estación A2.2	57,48	56,08	61,41	60,99	64,21	59,15	59,26	58,98	55,82	59,9	58,46	57,6	709,34
Estación A2.3	57,38	54,54	61,72	61,71	62,17	59,32	58,92	60,12	56,44	59,9	57,5	57,79	707,51
Estación A1.1	56,18	54,78	57,59	56,38	61,18	59,51	58,06	58,24	56,56	58,96	56,06	55,78	689,28
Estación A1.2	53,6	49,26	58,65	59,22	63,09	57,69	59,04	58,16	55,73	60,39	55,71	55,9	686,44
Estación A1.3	57,54	60,44	62,56	62,97	63,84	52,25	59,93	57,95	58,45	61,46	57,37	57,25	712,01
Estación A1.4	57,22	54,49	58,93	58,32	60,78	58,23	59,12	59,12	56,91	59,26	56,31	57,33	696,02

Estos valores nos permiten evaluar el volumen de agua que puede entrar y salir del sistema hidrológico, ayudándonos así, a determinar los excedentes de agua que se encuentra en el suelo o en su contraparte los déficits de agua durante el transcurso de estos últimos años.



Figura 9. Recarga Potencial de las estaciones hidrometeorológicas estudiadas en la ciudad de Bogotá. Fuente: Autor

9.2 Análisis de los Resultados

Como se evidencia en las gráficas de la figura 12, presentadas anteriormente y haciendo un análisis general para las dos áreas antes mencionadas, podemos determinar que las zonas en donde se observa que existe las mayores cantidades de recarga hacia el acuífero, se dan en las zonas en las que se observa el mayor número de áreas de recarga en la ciudad, siendo estas parques, lotes abandonados y humedales en su mayoría. Correspondientemente a esto, las estaciones que presentaron la mayor recarga potencial en el área 2, son las estaciones A2.2 y A2.3, esto se debe a que en estas se observa un claro aumento en la vegetación del área, lo que provoca consigo un aumento en la capacidad de recarga del acuífero, lo cual contrasta al mirar que la evapotranspiración presentada para estas área es menor que la infiltración, lo que da como resultado que durante algunos de los meses del año ocurra recarga en los acuíferos. Por otro lado, las zonas en las que la recarga es nula o muy baja corresponden a zonas muy impermeabilizadas por la urbanización que se encuentra en estas y por lo tanto son áreas en las que la presencia de parques o humedales que sirven como fuente para la infiltración del agua que precipita, sea muy baja, quedando así que la recarga sea completamente despreciable, lo que necesariamente no supone un problema, sino que nos indica que el sistema hidrogeológico del área se encuentra en un (como evaporación y desagüe). Si las entradas (como precipitación, recarga desde fuentes superficiales) son igualmente compensadas por las salidas (como evaporación y desagüe), el balance resultante sería cero. Esto podría ocurrir en áreas donde el ciclo hidrológico está en equilibrio y no hay acumulación neta de agua subterránea, lo cual se puede constatar en la litología del área, en donde si hay capas geológicas impermeables o suelos con baja capacidad de

infiltración, es probable que una parte considerable del agua superficial no logre infiltrarse en el acuífero, manteniendo así un equilibrio entre las entradas y salidas.

. Con estas observaciones es posible establecer que el mayor porcentaje de área en el área 2, se comporte como una zona de tránsito para el agua, debido a que está no encuentra los medios necesarios para poder infiltrar de manera correcta y por lo tanto recargar estos acuíferos, quedando así que el balance general para esta área sea de 318,17 mm de recarga anual, siendo esta aportada en su totalidad por las zonas cercanas a las estaciones A2.2 y A2.3.

El área 1 presenta el mismo comportamiento que se encuentra en el área 2, en donde las estaciones A1.1 y A1.2 son las que evidencian recarga apreciable hacia los acuíferos por las mismas razones que en el área 2, quedando un balance general de 196,69 mm de recarga anual, si observamos los balances generales de las dos áreas, encontramos que, a pesar de que el área 2 cuenta con una estación hidrogeológica menos, presenta una recarga potencial mayor que en el área 1, esta situación se puede explicar debido a que el modelo para el cálculo de la recarga potencial de un acuífero, también evalúa el medio por el que el agua infiltra y al momento de observar las litologías presentes en ambas áreas, encontramos que las del área 1, son en general intercalaciones de limos arcillosos que varían en facies lateralmente, estas son texturas de granos finos, haciendo que en el área 1, se produzca un impedimento mayor a la hora en la que la precipitación infiltra en el suelo. Las especificaciones en detalle de las litologías presentes en las 2 áreas se encuentran más adelante.

La recarga del sistema hidrogeológico en el área 1, se produce durante los meses entre abril - mayo y noviembre con una pequeña recarga en el mes de diciembre, debido a que en estas épocas del año se puede evidenciar un aumento en la precipitación (a excepción de diciembre), lo

que produce que haya una mayor tasa de infiltración al suelo y por lo mismo exista un tipo de “Exceso” de agua, esto se puede observar en las gráficas anteriores, las cuales nos muestran que los “Aportes” de agua en estos meses, son mayores a los “Consumos” que se dan en el suelo, por lo que este “exceso” de agua procedería a recargar el acuífero. En los meses restantes se observa una recarga nula al sistema hidrogeológico evidenciando así, un “Déficit” en el abastecimiento al sistema, debido a que el agua que infiltra en el medio no es suficiente para satisfacer los requerimientos que presenta el suelo para recargar el acuífero, esto probablemente debido a que estas zonas se encuentran muy urbanizadas y por lo tanto impermeables, impidiendo en gran medida la infiltración al suelo y por lo tanto no cumpliría los requerimientos que exige este mismo. Con respecto a el área 2, encontramos un comportamiento parecido al del área 1, en donde la recarga potencial del acuífero se da en las zonas más proximales a vegetación y los casos en donde no ocurre recarga potencial al acuífero son zonas en donde la urbanización ha erradicado en su mayor parte la presencia de áreas de recarga. Para esta área se observa el mismo patrón de recarga potencial que en el área 1, el cual se da entre los meses de marzo – mayo y noviembre – diciembre.

Con esto en cuenta, el balance hídrico general de las áreas demuestra que las zonas urbanas correspondientes a las 2 áreas actúan como un sistema de tránsito para el flujo de agua, ya que estas presentan un “Déficit” hídrico para recargar el acuífero, debido a que este solamente puede satisfacerse por medio de áreas de parques o lotes vacíos, lo cual observamos que no se presenta en una medida apreciable y por lo tanto haciendo que en estas zonas la recarga sea mínima o nula. La zona perimetral del área 1 y el área 2, ubicadas en las cercanías de las estaciones A1.1, A1.2, A2.2 y A2.3 vendrían a desempeñar el papel de las zonas de recarga de

los acuíferos subsuperficiales, en donde existe este “Exceso” hídrico que se necesita para recargar el sector.

Analizando cada una de las estaciones hidrometeorológicas en las que fue realizado el balance hídrico de suelos, encontramos que:

El balance hídrico de la estación A2.1, nos evidencia que existen épocas del año en donde la precipitación es mucho mayor al de los demás meses, los cuales se presentan de Octubre – Mayo, teniendo los picos más altos en los meses de octubre y diciembre, presentando valores de precipitación de 86,37 y 89,24 mm respectivamente, al momento de analizar estos datos y relacionarlos con los valores de “Consumos” y “Aportes” en el sistema hidrogeológico, se tienen valores de recarga potencial al acuífero de 0 mm anuales, al observar la gráfica encontramos meses en los que los “Consumos” son mayores que los aportes, esto sugeriría un balance hídrico negativo, lo que podría significar que en estos meses se estaría dando una disminución en el nivel freático del agua subterránea, esto se puede deber a que como se muestra en las gráficas anteriores, existen meses en donde la precipitación y la infiltración es en gran medida mayor a la evapotranspiración, lo que causa que en los meses posteriores como lo es diciembre, la evapotranspiración tenga la suficiente agua disponible para ser más intensa que la infiltración en ese mes. Otro factor podría ser que producto de estas precipitaciones e infiltraciones previas, la humedad del suelo, pueda afectar la capacidad del suelo para infiltrar agua, por lo que, si en algunos meses el suelo ya se encuentra saturado debido a lluvias anteriores, la infiltración puede ser menos eficiente y la evapotranspiración podría dominar.

El balance hídrico en la estación A2.2, nos muestra al igual que en la estación anterior patrones de precipitación marcados, en donde los meses de Octubre – Mayo, son las épocas

donde se da mayor precipitación, teniendo los picos más altos en los meses de abril y noviembre, presentando valores de precipitación de 150,04 y 159,29 mm respectivamente, al relacionar los valores de consumos y aportes, encontramos un valor de recarga potencial al acuífero de 165,72 mm anuales, al observar la gráfica encontramos la misma situación que en la anterior estación, en donde tenemos meses en los que los consumos son mayores que los aportes, probablemente debido a las mismas razones explicadas anteriormente. En ciertos meses encontramos que los aportes al sistema hidrogeológico son mayores a los consumos del sistema, pero no existe una recarga potencial al acuífero, esto puede deberse a varios factores, como el de un flujo subsuperficial lento debido a las características texturales del suelo impidiendo que se evidencie una recarga en el acuífero. También se puede deber a la saturación previa del suelo, haciendo que el exceso de agua en la superficie provoque escorrentía en lugar de recargar el acuífero.

El balance hídrico en la estación A2.3, presenta el mismo comportamiento en la precipitación que las estaciones anteriores y evidencia picos de precipitación en los meses de abril y noviembre, con valores de 214,36 y 127,36 mm respectivamente, relacionando los valores de consumos y aportes, encontramos un valor de recarga potencial del acuífero de 152,45 mm anuales. Esta estación también presenta las mismas situaciones que las anteriores con respecto a los aportes y consumos del sistema hidrogeológico de la zona.

El balance hídrico en la estación A1.1, nos muestra el mismo comportamiento en lo que respecta a los meses de mayor precipitación que las estaciones anteriores y evidencia picos de precipitación en los meses de abril y noviembre, con valores de 140,67 y 142,57 mm respectivamente, relacionando los valores de consumos y aportes, encontramos un valor de recarga potencial del acuífero de 119,24 mm anuales. Esta estación al igual que las mencionadas

anteriormente también presenta las mismas situaciones que las anteriores con respecto a los aportes y consumos del sistema hidrogeológico de la zona, las cuales se deben a las mismas razones explicadas anteriormente.

El balance hídrico en la estación A1.2, nos evidencia unos picos en el comportamiento de la precipitación en los meses de abril y octubre, con valores que oscilan entre 126,28 y 116,18 mm respectivamente, a su vez los valores de consumos y aportes, nos muestran un valor de recarga potencial del acuífero en varios meses del año llegando así a tener una recarga potencial de 74,77 mm anuales, el cual es un valor bastante bajo. Por lo tanto, aunque en algunos meses se presente una potencial recarga al acuífero lo que tenemos al final del año es que en general existe un déficit de agua en el sistema hidrogeológico.

Por último, encontramos dos estaciones las cuales son A1.3 y A1.4, que evidencia un balance hídrico similar, el cual presenta el mismo comportamiento en la precipitación que las estaciones anteriores y evidencia picos de precipitación, en los meses de abril y noviembre, con valores de 111,65 y 101,71 mm para la estación A1.3 y para la estación A1.4 en los meses de octubre – noviembre, teniendo valores de precipitación de 86,35 y 89,24 respectivamente. Al relacionar los valores de consumos y aportes, encontramos un valor de recarga potencial del acuífero casi nulo, siendo así un valor de 2,68 mm al año para la estación A1.3 y de 0 mm anuales para la estación A1.4.

Las tablas de los resultados del balance hídrico se muestran en el Anexo B.

9.3 Análisis Hidrogeológico

9.3.1 Parámetros Hidrogeológicos

Tomando en cuenta las descripciones litológicas de las perforaciones para cada pozo en el área de estudio, se procedió a establecer los valores de porosidad efectiva en base a parámetros teóricos, recopilados de información complementaria. Para la determinación de la conductividad hidráulica se implementaron los métodos de Hvorslev y Bouwer & Rice (INERCO Consultoría Colombia, 2023), en donde adicionalmente se correlacionaron con la categoría propuesta por (Lewis *et al*, 2016), para estimar la permeabilidad de un medio en base a su litología, tal cual se evidencia en el Anexo D, en donde se postran todos los parámetros hidrogeológicos hallados para cada punto estudiado.

La empresa INERCO Consultoría Colombia, realizó las interpretaciones litológicas generando el perfil geológico correspondiente para cada proyecto, los cuales se evidencian en el Anexo E. Al analizar las características litológicas de estos, evidenciamos que en el área 1, afloran la formación sabana y la formación chía, donde localmente encontramos que esta área se encuentra caracterizada por litologías con las granulometrías finas, siendo estas intercalaciones entre arcillas, arcillas limosas y limos arcillosos, las cuales lateralmente presentan algunos cambios de facies, estas litologías predominantemente finas se ven reflejadas en los parámetros hidrogeológicos como la conductividad hidráulica y las velocidades de los flujos, debido a que estas partículas tienden a estar más cerca entre ellas, provocando así, que los espacios que estos puedan tener disponibles para libre el tránsito del agua, sea limitado y por lo tanto resultando en la clara dificultad de que este flujo subsuperficial fluya libremente, aparte de la propiedad que presentan estos suelos arcillosos y limosos de “hincharse” o “comprimirse” en función de los cambios de humedad que puedan surgir en la zona, haciendo así, que los poros en estos

materiales se puedan cerrar reduciendo la capacidad del flujo de agua para circular en este medio hidrogeológico.

En el área 2, de la misma manera que en la 1, encontramos que afloran las formaciones sabana (Qsa) y chía (Qch), explicadas en el apartado de marco geológico y visualizadas en la Figura 2. En esta área encontramos composiciones litológicas un poco más gruesas que en el área 1, en esta encontramos texturas caracterizadas por intercalaciones limo arenosas o arcillosas que suprayacen las texturas más gruesas como las areno limosas y las de arenas finas, que se encuentran en las capas más bajas de las perforaciones estudiadas. Estas a diferencia de las litologías del área 1, al tener los poros de mayor tamaño, presentan una menor resistencia al flujo, permitiendo así un movimiento más rápido y eficiente en el subsuelo, cosa que se ve reflejada en las velocidades de flujo determinadas para los piezómetros del área 2.

Al observar las direcciones de flujo que se evidencian en los mapas de isopiezas, encontramos que en el área 1, la dirección preferencial de estos flujos subsuperficiales es en dirección hacia el río Bogotá debido a su cercanía (entre 400m y 2000m) o hacia los canales que se encuentran más próximos a ellos. Las direcciones del flujo del área 2, presentan los mismos comportamientos del área 1, los cuales muestran direcciones preferenciales hacia los cuerpos de agua (canales) más cercanos, cosa que era de esperarse.

En general encontremos que, para las dos áreas, los flujos subsuperficiales tienen una dirección preferencial hacia los canales o cuerpos de agua más cercanos a ellos. Algunos de estos puntos se encuentran sobre divisorias de aguas haciendo que la dirección del flujo ocurra hacia diferentes lados, como son los casos de los puntos A1P3, A1P9 y A2P2, impidiendo así ver una dirección de flujo preferencial, pero se espera que, si amplía el área de muestro a una escala un

poco más grande de la misma manera que las demás, estos flujos presenten una dirección hacia los cauces más cercanos a ellos. Con esto dicho, se intuye que la conectividad hidráulica entre los materiales que permiten el flujo subterráneo bajo las zonas estudiadas y las masas de agua superficiales antes indicadas, es limitada o nula debido a que los canales hacia los que estos flujos subsuperficiales se dirigen, son eso, canales. Del mismo modo se observa que algunas direcciones de flujo van hacia tramos de cauces de algunos ríos locales que se encuentran canalizados. Por tanto, aunque de forma natural pudiera existir drenaje desde la zona estudiada hacia esos cuerpos a través de los sedimentos fluvio-lacustres, la canalización de estos cauces, lo impide.

Por último, al analizar la topografía de las áreas, nos hacemos constatar que los parámetros hidrogeológicos como el gradiente hidráulico y la velocidad del flujo son correctos, debido a que el estudio en su totalidad fue llevado a cabo en un área con una topografía plana que casi no presenta cambios en su misma a lo largo de toda su extensión. Esto hace que parámetros como los ya antes mencionados sean pequeños, debido a que el nivel freático por lo general suele seguir la forma del relieve, pero con menor pendiente, y se eleva o baja según las épocas de lluvia o sequía. Por lo que al presentarse una topografía plana parámetros como el gradiente hidráulico que es la diferencia de altura entre dos puntos del acuífero dividida por la distancia horizontal que los separa no se ven perturbados, debido a las pocas variaciones significativas en el nivel freático clasificándolo de esta manera como un gradiente relativamente suave o uniforme. De la misma manera, parámetros como la velocidad del flujo que depende de la permeabilidad del medio poroso y del mismo gradiente hidráulico tiende a ser lenta en comparación con topografías más abruptas o accidentadas, tal cual como se evidencian en los

resultados obtenidos en este trabajo y que se constatan en el comportamiento del nivel freático hallado en cada perforación, en donde a lo largo de toda el área de estudio los cambios en las profundidades del nivel freático en general, son relativamente pequeñas de no muchos metros de diferencia entre sí, como se puede constatar en el Anexo D de este trabajo.

9.4 Vulnerabilidad del acuífero

La vulnerabilidad intrínseca de una formación hidrogeológica, se puede entender como su grado de exposición a una potencial afección, evaluando solo las propiedades de los materiales que la componen y del agua subterránea que se encuentra en ella, sin tener en cuenta las potenciales fuentes de contaminación (INERCO Consultoría Colombia, 2023).

Los datos utilizados para la realización de esta estimación, fueron sacados de las perforaciones realizadas por la empresa INERCO. Al analizar los resultados suministrados por los parámetros expuestos anteriormente en el marco teórico para la realización de esta metodología, podemos decir que los resultados obtenidos son coherentes respecto a los parámetros y características encontrados anteriormente de estos acuíferos, en donde los valores obtenidos por el método GOD arrojaron un calificativo de moderada vulnerabilidad a la contaminación, para la mayoría de las áreas analizadas en este trabajo, con algunas excepciones que arrojaron una vulnerabilidad baja a la contaminación. Estas categorías se asocian en gran medida con las características que muestran los acuíferos estudiados en este trabajo, debido a que corresponden a formaciones hidrogeológicas de bajo rendimiento, cuya permeabilidad suele considerarse baja a muy baja, debido al predominio de texturas finas como los limos y las arcillas, la determinación de estos resultados se encuentra en el Anexo F.

Cabe resaltar que esta metodología no se pudo realizar en todas las áreas estudiadas, debido a que en las áreas A1P9 y A2P6 existe la presencia de una capa que constituye una barrera a la eventual infiltración de contaminantes, disminuyendo así la vulnerabilidad del acuífero. Con base a las condiciones litológicas e hidráulicas de estos emplazamiento no es posible aplicar una metodología para evaluar el grado de vulnerabilidad acuífera, en primera instancia, debido a la oscilación natural del nivel freático registrada en los monitoreos de agua, constituyendo un nivel freático colgado, el cual está siendo confinado hacia la base por la presencia de una capa sello constituida por arcillas densas y firmes que impiden la migración de contaminantes a capas acuíferas más profundas, las cuales se evidencian en el Anexo E en los cortes geológicos.

10 Conclusiones y recomendaciones

Gracias a todo lo anterior, podemos interpretar que los mapas de isopiezas son un recurso indispensable para poder realizar una caracterización hidrogeológica de la manera más completa posible, debido a que la importancia de los parámetros hidrogeológicos que se pueden estimar mediante estas fuentes como la dirección del flujo, el gradiente hidráulico, la conductividad hidráulica, la velocidad del flujo y etc., nos proporcionan una visión detallada de cómo es el funcionamiento hídrico de los acuíferos, ya que nos facilitan la visualización de las distribuciones espaciales de los niveles freáticos de los acuíferos estudiados, aparte de otra información como son la dirección del flujo subsuperficial o los gradientes hidráulicos, que son indispensables para poder estimar la velocidad del flujo (17).

Dado los resultados obtenidos en la estimación de la recarga potencial (13) de los acuíferos para las áreas 1 y 2, encontramos que tres estaciones hidrometeorológicas presentan problemas por un “déficit” de agua en su sistema, siendo esto producto de la impermeabilización que sufren estas dos localidades y la falta de zonas de recarga como parques, zonas verdes, humedales, entre otros medios por los que la precipitación que se da en estas zonas, logre infiltrar en el suelo y recargar de esta manera los acuíferos.

La recarga de los acuíferos de manera local para las localidades estudiadas, se da en su mayoría por medio de zonas libres de la industrialización de la ciudad, como parques, humedales, lotes vacíos, etc. Esto se debe a que el desarrollo masivo de la ciudad ha llevado a alterar los procesos naturales por los que se recargan los acuíferos, haciendo que este proceso natural se limite solo a determinadas zonas de la ciudad como las ya antes mencionadas.

Para tener una mejor visión de la recarga potencial de estos acuíferos, es necesario que se tenga una mayor muestra de estaciones hidrometeorológicas que cuenten con los componentes necesarios para realizar este tipo de cálculos (Precipitación y temperatura) a lo largo de todos los meses del año, debido a que lamentablemente para este trabajo, no se contó con las suficientes estaciones como para realizar un análisis más detallado de este proceso en la totalidad de las áreas estudiadas, esto debido a la falta de información y al mal funcionamiento de las estaciones hidrometeorológicas dentro del área de estudio.

Con respecto a la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos es importante destacar que, sobre este tipo de formaciones, cualquier actividad o uso que se desarrolle debe tener resuelto el tratamiento controlado de sus residuos, y las actividades industriales deben contar con medidas de impermeabilización de sus zonas de procesos y almacenamiento. Además, en lo posible se deben desarrollar sistemas locales de tratamiento de aguas, manejo y control adecuado de vertimientos cuando no estén integradas en sistemas públicos de saneamiento, y campañas de monitoreo a las estructuras que almacenen sustancias que puedan generar algún tipo de emanación de lixiviados.

Las líneas isopiezas que representan la profundidad del nivel freático con las clasificaciones de vulnerabilidad de la metodología GOD, obtienen un valor agregado debido a que con estas se podría identificar áreas específicas que tienen una mayor o menor susceptibilidad a la contaminación en función de la proximidad del nivel freático a la superficie. Las zonas donde las líneas isopiezas están más juntas y se superponen con áreas de alta vulnerabilidad indicarían áreas críticas que requieren una mayor atención en términos de protección y gestión de la calidad del agua subterránea.

11 Lista de referencias

Foster et al. Groundwater quality protection. Washington D. C.: The World Bank, 2012.
[GWMATE Books - Groundwater Quality Protection.pdf \(un-igrac.org\)](#)

García Rodríguez, M., & Fernández Escalante, A. E. (2009). Hidrogeología básica. Las aguas subterráneas y su flujo. ResearchGate, de
https://www.researchgate.net/publication/263918938_Hidrogeologia_basica_Las_aguas_subterranas_y_su_flujo

Gómez, B & Cadena, C. (2017). Validación de las fórmulas de evapotranspiración de referencia (ET_o) para Colombia. IDEAM. <https://dokumen.tips/documents/validacin-de-las-formulas-de-evapotranspiracin-.html?page=20>

Guamán, G. (2017). Caracterización hidrogeológica y dinámica de los acuíferos de Quito en las estaciones y el viaducto en la primera línea del metro (Bachelor's thesis, Quito: UCE.).
<http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/10430>

Hernández, L. (2012). Ubicación de la Ciudad. <https://bogota.gov.co/>.
<https://bogota.gov.co/ubicacion-de-bogota-sitios-turisticos-vias-y-alrededores-de-bogota>

Hölting, Bernward & Coldewey Wilhelm. Hydrogeology. Springer Textbooks, Berlin, Germany, 2019.

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-56375-5>

INERCO Consultoría Colombia. (2023). Estudios ambientales, Bogotá: INERCO Consultoría Colombia.

Lewis, Cheney & Ódochartaigh. Guide to Permeability Indices. British Geological Survey, Nottingham, England, 2006

[Microsoft Word - CR_06_160 Guide to Permeability Indices \[MAL\].doc \(nerc.ac.uk\)](#)

Montoya, D. M. y Reyes, G. A. (2005). Geología de la sabana de Bogotá (1ª ed., p. 104). instituto colombiano de geología y minería INGEOMINAS, de
<https://mydokument.com/geologia-de-la-sabana-de-bogota.html>

Prosap (S.f). (R014) Medición de la infiltración en el suelo mediante infiltrómetros doble anillo. Recuperado
<http://www.prosap.gov.ar/Docs/INSTRUCTIVO%20R014%20infiltrometro%20doble%20anillo.pdf>

Sánchez, F. J. (2022). - Hidrología Superficial y Subterránea. 2ª ed. Kindle Direct Publishing. <https://hidrologia.usal.es/temas/Evapotransp.pdf>

Schosinsky, G. (2006). Cálculo de la Recarga Potencial de Acuíferos Mediante un Balance Hídrico de Suelos. Revista Geológica de América Central.

Secretaria Distrital de ambiente SDA. (2012). Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá. Bogotá: SDA.

Secretaría Distrital de Ambiente y Pontificia Universidad Javeriana. (2017). Modelo hidrogeológico conceptual del acuífero subsuperficial o somero en el perímetro urbano del distrito capital. https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dlm_download&p=15342

Weight, W. D. Hydrogeology Field Manual. McGraw Hill, New York, 2008.

12 Anexos

- Anexo A. Cálculo de la Evapotranspiración
- Anexo B. Balance hídrico y recarga potencial del acuífero
- Anexo C. Mapas de isopiezas
- Anexo D. Parámetros Hidrogeológicos
- Anexo E. Cortes Geológicos
- Anexo F. Vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos
- Anexo G. Hojas de cálculo ETP
- Anexo H. Hojas de cálculo Balance Hídrico