

**EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO GUADALUPE A LA
CONTAMINACIÓN EN SUBACHOQUE CUNDINAMARCA, CON LA
IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DRASTIC.**

**LIZETH TATIANA VEGA VEGA
LAURA ANGELICA ORJUELA QUIROZ**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
JULIO 2018**

**EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO GUADALUPE A LA
CONTAMINACIÓN EN SUBACHOQUE CUNDINAMARCA, CON LA
IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DRASTIC.**

**LIZETH TATIANA VEGA VEGA
LAURA ANGELICA ORJUELA QUIROZ**

PROYECTO DE GRADO

**Director:
CAMILO VARGAS TERRANOVA
ING. AMBIENTAL Y SANITARIO, MSc. GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RECURSOS
GEOLÓGICOS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
JULIO 2018**

APROBACIÓN

DEDICATORIA

A Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mi mamá, por su perseverancia y constancia que la caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante, por su ejemplo y sobre todo por su gran amor.

A mi tía Lucrecia por su amor, su comprensión, su fuerza, por estar conmigo y apoyarme siempre, la quiero mucho.

A mis abuelos por darme excelentes valores en mi infancia y por su apoyo en todo sentido.

A Ana Maria Fonseca, por ser mi mejor amiga y estar siempre cuando más necesito, dándome moral para seguir adelante.

Dedico principalmente este trabajo a Maria Angelica Triana Vega (QEPD), por enseñarme desde pequeña a ser un ser humano, ante todo, por estar incondicionalmente conmigo, por ser mi hermana, mi cómplice, mi maestra, mi todo, gracias por enseñarme el verdadero valor de la vida, por enseñarme a ser valiente y dejar ese gran legado en mí. Por siempre y para siempre te amo mi princesa.

Y por último a todas las personas que hicieron parte de este proceso.

Muchas gracias.

Lizeth Tatiana Vega Vega.

Este trabajo se lo quiero dedicar a mi familia la cual me ha acompañado incondicionalmente en este largo proceso de formación a nivel personal y educativo.

A mis padres por su amor, dedicación, comprensión en cada circunstancia presentada en esta etapa tan importante de mi vida y principalmente por darme la gran enseñanza de que ante cualquier situación debemos tener la frente en alto y sin importar los obstáculos debemos alcanzar nuestros sueños.

A mis hermanos por brindarme su ayuda en los momentos en los que más los necesite.

A mi hermana por ser una gran amiga, consejera, por demostrarme que solo se necesita de dedicación y perseverancia para alcanzar lo que nos propongamos.

A mi mejor amiga Angie Cano por sus buenos consejos en las situaciones más difíciles y por mostrarme que los amigos están en los buenos y malos momentos.

A mis amigos por darme esos alientos para seguir en los momentos en que todo parecía perdido.

*Muchas Gracias
Laura Angélica Orjuela Quiroz*

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al director de este trabajo el Ingeniero Camilo Vargas Terranova, por su dedicación, por brindar su tiempo para asesorarnos y guiarnos con motivación y gran conocimiento, gracias por ser un ejemplo profesional a seguir.

Al profesor Johan Álvarez por su dedicación a los estudiantes y ser un gran ser humano y sobre todo un increíble profesor.

A Cristian Rojas, porque a lo largo de la carrera fue la persona más incondicional en este gran proceso, y por ser un excelente amigo.

A mis amigos de la universidad, que me apoyaron en todo el proceso universitario, e hicieron una experiencia llena de alegrías y buenos recuerdos.

A Federico Lara y Diana Salazar por ser grandes maestros, y apoyarme en mi carrera y en mi vida personal.

Y por último a todas las personas que aportaron un granito de arena a esta investigación.

Muchas gracias

Lizeth Tatiana Vega Vega

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
GLOSARIO	15
Resumen	18
Abstract	19
1. Introducción	20
2. Objetivos	21
2.1. General	21
2.2. Específicos	21
3. Marco Teórico	22
3.1. Evaluación de vulnerabilidad hidrogeológica	22
3.2. Métodos de evaluación de la vulnerabilidad	23
3.3. DRASTIC	25
3.3.1. (D) Depth water / profundidad del nivel freático	26
3.3.2. (R) Net recharge / recarga neta	26
3.3.3. (A) Aquifer media / litología del acuífero	27
3.3.4. (S) Soil media / tipo de suelo	29
3.3.5. (T) Topografía relieve	31
3.3.6. (I) Impact / impacto en la zona vadosa	32
3.3.7. (C) Hydraulic conductivity/conductividad hidráulica	34
3.3.8. Ponderación	35
4. Marco de referencia	36
4.1. Área de estudio	36
4.2. Clima	37
4.3. Geología	37
4.4. Hidrografía	38
4.5. Hidrogeología	39
4.6. Dinámica de flujo y recarga	39
4.7. Unidades de paisaje	40
4.8. Aspectos socioeconómicos	41

5. Marco legal	42
6. Metodología	46
6.1. Valores de ponderación	47
6.1.1. (D) profundidad del nivel freático.	48
6.1.2. (R) recarga neta	48
6.1.3. (A) litología del acuífero	49
6.1.4. (S) Tipo de suelo	49
6.1.5. (T) Topografía	50
6.1.6. (I) Naturaleza de la zona no saturada.	50
6.1.7. (C) Conductividad hidráulica	50
6.2. Índice de vulnerabilidad DRASTIC	51
7. Análisis de resultados	53
7.1. Valores de ponderación	53
7.1.1. (D) profundidad del nivel freático	53
7.1.2. (R) recarga neta	56
7.1.3. (A) litología del acuífero	57
7.1.4. (S) Tipo del suelo	62
7.1.5. (T) Topografía	64
7.1.6. (I) Impacto en la zona no Vadosa	66
7.1.7. (C) Conductividad hidráulica “K”	70
7.2. Índice de vulnerabilidad DRASTIC	72
Conclusiones	77
Recomendaciones	79
Bibliografía	80

TABLA DE ANEXOS

Anexo A: Mapa Evaluación Parámetro Dr
Anexo B: Mapa Evaluación Parámetro Rr
Anexo C: Mapa Evaluación Parámetro Ar
Anexo D: Mapa Clasificación del parámetro Ar
Anexo E: Mapa tipo de suelo en el municipio Subachoque
Anexo F: Mapa Evaluación Parámetro Sr
Anexo G: Mapa de pendientes del municipio de Subachoque
Anexo H: Mapa Evaluación Parámetro Tr
Anexo I: Mapas Unidades Crono estratigráficas del municipio de Subachoque
Anexo J: Mapa clasificación parámetro Ir
Anexo K: Mapa de conductividad hidráulica del municipio de Subachoque
Anexo L: Mapa Evaluación Parámetro Cr
Anexo M: DRASTIC - herramienta Overlay
Anexo N: DRASTIC - herramienta Algebra de mapas
Anexo O: Tabla pozos seleccionados

TABLA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1: Delimitación del municipio de Subachoque	36
Figura 2: Morfología de la superficie del municipio de Subachoque	40
Figura 3: Resumen de la metodología implementada	47
Figura 4: Sistema de coordenadas	48
Figura 5: Mapa clasificación del parámetro (Dr)	56
Figura 6: Mapa clasificación del parámetro (Rr)	57
Figura 7: Mapa clasificación del parámetro (Ar)	60
Figura 8: Clasificación de la litología	61
Figura 9: Tipo de suelo en Subachoque	62
Figura 10: Mapa clasificación del parámetro (Sr)	64
Figura 11: Mapa de pendiente del municipio Subachoque	65
Figura 12: Mapa clasificación del parámetro (Tr)	66
Figura 13: Mapa unidades cronoestratigrafías Subachoque	68
Figura 14: Clasificación del parámetro Ir	69
Figura 15: Conductividad hidráulica del municipio Subachoque.	71
Figura 16: Clasificación parámetro (Cr)	72
Figura 17: DRASTIC - herramienta algebra de mapas	75
Figura 18: DRASTIC - herramienta Weighted Sum	76

TABLA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1: Definición Práctica de las clases de vulnerabilidad	24
Tabla 2: Rangos y puntuaciones para profundidad (D)	26
Tabla 3: Rangos y puntuaciones para recarga neta (R)	27
Tabla 4: Rangos y puntuaciones de litología del acuífero (A)	28
Tabla 5: Rangos y puntuaciones para tipo de suelo (S)	30
Tabla 6: Rangos y puntuaciones para topografía (T)	32
Tabla 7: Rangos y puntuaciones para naturaleza de la zona no saturada (I)	32
Tabla 8: Rango y puntuación de conductividad hidráulica (C)	34
Tabla 9: Valores calificación final DRASTIC	35
Tabla 10: Parámetros físicos de la cuenca Subachoque	39
Tabla 11: Marco legal relacionado con el proyecto.	42
Tabla 12: Factores de ponderación	51
Tabla 13: Grados de Vulnerabilidad DRASTIC	52
Tabla 14: Características litológicas	58
Tabla 15: Calificación por tipo suelo	63
Tabla 17: Unidades cronoestratigráficas Subachoque	67

TABLA DE GRÁFICAS

pág.

Grafica 1: Distribución de rangos de evaluación (Ar)

61

TABLA DE ABREVIATURAS

SIG	Sistema de información geográfica
In situ	En el sitio
AIH	Asociación internacional de hidrogeólogos
p.e	Por ejemplo
Km ²	Kilómetros cuadrados
m.s.n.m	Metros sobre el nivel del mar
°C	Grados centígrados
Mm	milímetros
M	Metros
Km	Kilómetros
m ²	Metros cuadrados
L	Litros
S	Segundos
DEM	Modelo de elevación digital
TIN	Red irregular de triángulos
INGEOMINAS	Instituto colombiano de geología y minería
IDEAM	Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales
MAVDT	Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial
EPA	Environmental Protection Agency
IGAC	Instituto geográfico Agustín Codazzi
ANI	Agencia nacional de infraestructura
CAR	Corporación autónoma regional de Cundinamarca
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

PMA	Plan de manejo ambiental
SGC	Servicio geológico colombiano
Qca	Depósitos aluviales y coluviales
Qal	Depósitos aluviales y de llanuras aluviales
Q1l	Arcillas, turbas, y arcillas arenosas con niveles delgados de gravas. Localmente, capas de depósitos de conjunto diatomeas.
K6E1	Arcillolitas rojizas con intercalaciones de cuarzoarenitas de grano fino. Mantos de carbón a la base.
E1	Conglomerados intercalados con arenitas de grano medio a grueso y lodolitas carbonosas
B6K6	Shales, calizas, arenitas, cherts y conjunto de fosforitas
K1K6	Shales, calizas, fosforitas, cherts y secuencia de cuarzoarenitas.

GLOSARIO

ACUÍFERO: rocas que almacenan y transmiten agua en cantidades significativas, entendida como el sistema que involucra las zonas de recarga, tránsito y de descarga, así como sus interacciones con otras unidades similares, las aguas superficiales y marinas[1][2].

ACUICLUDOS: rocas con una capacidad de almacenamiento apreciable pero con capacidad de transmisión prácticamente nulo[2].

ACUITARDOS: rocas que almacenan agua y la transmiten lentamente[2].

ACUIFUGOS: rocas que ni almacenan ni transmiten agua[2].

ACUÍFERO CONFINADO: es aquel que está aislado de la atmósfera por unidades geológicas impermeables, generando mayor presión sobre el recurso hídrico, por lo que el acuífero siempre está saturado de agua y en todos los puntos de agua se encuentra a una presión mayor que la atmosférica[2].

ACUÍFERO LIBRE: se encuentra en contacto directo con la zona subsaturada del suelo, en los que el agua subterránea se encuentra a la presión atmosférica, en cualquier punto por debajo de la superficie freática el agua está a una presión mayor que la atmosférica[2].

ACUÍFERO SEMICONFINADO: son aquellos en donde las unidades confinantes permiten cierto flujo de agua desde el acuífero hacia el exterior o viceversa[2].

AGUA SUBTERRÁNEA: las subálveas y las ocultas debajo de la superficie del suelo o del fondo marino que brotan en forma natural, como las fuentes y manantiales captados en el sitio de afloramiento o las que requieren para su alumbramiento obras como pozos, galerías filtrantes u otras similares[1].

DRASTIC: metodología estadounidense diseñada por la EPA que permite evaluando el potencial de contaminación de los acuíferos determinando la vulnerabilidad intrínseca[3].

GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO: proceso que promueve la gestión y el aprovechamiento coordinado de los recursos hídricos, la tierra y los recursos naturales relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los recursos vitales[4].

MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL: representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, permitiendo caracterizar las formas de relieve[5].

MODELO HIDROGEOLÓGICO: 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 e isotópica y permite tener una visión del comportamiento de los acuíferos o sistemas acuíferos de un área dada a la escala deseada[6].

NIVEL FREÁTICO: límite superior de la zona saturada en la que todos los poros de la roca se encuentran llenos de agua y/o profundidad(m) medida desde la superficie en un punto de referencia, hasta la tabla de agua[2].

PERMEABLE: capacidad de un material de permitir un flujo a través de él sin alterar su estructura interna[2].

POROSIDAD: se define como el volumen ocupado por unidad de volumen total de roca[7].

RECURSO HÍDRICO: corresponde a las aguas superficiales, subterráneas, meteóricas y marinas[1].

RECURSO HÍDRICO SUBTERRÁNEO: es agua que se filtra a través de grietas y poros de las rocas y sedimentos que yacen debajo de la superficie de la tierra, acumulándose en las capas arenosas o rocas porosas del subsuelo. El agua se almacena y mueve en las formaciones geológicas que tienen poros o vacíos[8].

RESILIENCIA: capacidad de los ecosistemas para absorber perturbaciones, sin alterar significativamente sus características naturales de estructura y funcionalidad, es decir, regresar a un estado similar al original una vez que la perturbación ha terminado[1].

SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG): es un conjunto de herramientas que integra y relaciona diversos componentes (usuarios, hardware, software, procesos) que permiten la organización, almacenamiento, manipulación, análisis y modelización de grandes cantidades de datos procedentes del mundo real que están vinculados a una referencia espacial, facilitando la incorporación de aspectos sociales-culturales, económicos y ambientales que conducen a la toma de decisiones de una manera más eficaz[9].

SISTEMA ACUÍFERO: es la agrupación de formaciones rocosas que corresponde a un dominio espacial, en que debido a sus propiedades permite la dinámica del agua, permitiendo transportar o almacenar agua, es general, donde existen uno o varios medios rocosos (acuíferos) conectados o no entre sí[1][10].

SUPERFICIE FREÁTICA: zona no saturada la cual está limitada en su parte superior por una superficie en la que el agua se encuentra a presión atmosférica[2].

SISTEMA HIDROGEOLÓGICO: acuíferos y acuitardos que conforman los niveles más permeables las cuales ejecuta el almacenar volúmenes de agua, tanta como lo permita su porosidad y transmisividad, desde las áreas de recarga a las áreas de descarga [11]

TRANSMISIVIDAD: caudal de agua que pasa por una sección de acuífero de base unitaria y de altura de su espesor saturado[2].

VULNERABILIDAD: es la cualidad de ser susceptible a un cambio que puede afectar su estado original[2].

VULNERABILIDAD ACUÍFERA: relaciona que la zona no saturada al separar el acuífero, normalmente proporciona protección al agua subterránea frente a la contaminación. A partir de esto, cuando esa protección es poco resistente, el acuífero será más sensible o susceptible a la alteración química del agua anteproyecto[2],

VULNERABILIDAD HIDROGEOLÓGICA: características propias de un acuífero que determinan la facilidad con que un contaminante derivado de actividades antrópicas o fenómenos naturales pueda llegar a afectarlo[12].

VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DE UN ACUÍFERO A LA CONTAMINACIÓN: características propias de un acuífero que determinan la facilidad con que un contaminante derivado de actividades antrópicas o fenómenos naturales pueda llegar a afectarlo [1].

ZONA DE RECARGA Y DESCARGA: aquellas zonas que por condiciones geológicas y climatológicas gran parte de las precipitaciones se infiltran en el suelo hasta un acuífero en las partes más profundas de la cuenca. Dentro de las zonas de descarga están las cuencas que el acuífero abastece[2].

Resumen

La evaluación de la vulnerabilidad del agua subterránea permite determinar la sensibilidad del acuífero ante la presencia de contaminantes antropogénicos, esto a partir de la valoración de las características geológicas e hidrológicas. Las actividades humanas pueden comprometer la carga natural del acuífero, debido a que su estructura física y la composición del material de los acuíferos muestran resistencia al transporte de contaminantes desde la superficie hasta la capa freática.

Actualmente, se han propuesto numerosos métodos para evaluar la vulnerabilidad del acuífero. De manera similar, el modelo DRASTIC ® utiliza algoritmos informáticos y datos hidrogeológicos dentro de un entorno de Sistema de Información Geográfica (SIG) para calcular la vulnerabilidad del acuífero.

Se tomó el municipio de Subachoque, Cundinamarca, donde se implementó el modelo DRASTIC ® con el fin de delimitar las zonas de vulnerabilidad del acuífero Guadalupe. Para llevar a cabo los mapas representativos de las siete variables con la ponderación determinados por el modelo, se realizó por medio del software ArcGis 10.2.2®, con el fin de generar un mapa de vulnerabilidad para la gestión del recurso hídrico subterráneo en el municipio, recopilando la información en las diferentes entidades públicas del municipio de Subachoque, con los cuales se materializó un mapa temático final referente al grado de vulnerabilidad intrínseca frente a la contaminación para el sistema acuífero del municipio de Subachoque, donde se encontró zonas de vulnerabilidad bajas en la parte montañosa; vulnerabilidad moderada en la parte planicie, y con una vulnerabilidad alta en todo el centro del municipio, este comportamiento se debe a los niveles piezométricos bajos, a la topografía, sus características litológicas y geológicas.

Con el resultado final se realizan las recomendaciones apropiadas para el manejo del territorio, específicamente las zonas donde se presenta una vulnerabilidad alta, con el fin de tener un mejor uso y cuidado del acuífero.

Abstract

The evaluation of the vulnerability of groundwater allows determining the sensitivity of the aquifer in the presence of anthropogenic contaminants, this from the assessment of the geological and hydrological characteristics. Human activities can compromise the natural load of the aquifer, because its physical structure and the composition of the aquifer material show resistance to the transport of pollutants from the surface to the water table.

Currently, numerous methods have been proposed to assess the vulnerability of the aquifer. Similarly, the DRASTIC ® model uses computer algorithms and hydrogeological data within a Geographic Information System (GIS) environment to calculate the vulnerability of the aquifer.

It took the municipality of Subachoque, Cundinamarca, where the DRASTIC model was implemented in order to delimit the vulnerability zones of the Guadalupe aquifer. To carry out the representative maps of the seven variables with the weighting determined by the model, it was carried out using the ArcGis 10.2.2® software, in order to generate a vulnerability map for the management of the underground water resource in the municipality, collecting the information in the different public entities of the municipality of Subachoque, with which a final thematic map was materialized regarding the degree of intrinsic vulnerability to pollution for the aquifer system of the municipality of Subachoque, where low vulnerability zones were found in the mountainous part; moderate vulnerability in the flat part, and with a high vulnerability in the whole center of the municipality, this behavior is due to low piezometric levels, topography, lithological and geological characteristics.

With the final result, the appropriate recommendations are made for the management of the territory, specifically the areas where there is a high vulnerability, in order to have a better use and care of the aquifer.

1. Introducción

Las aguas subterráneas en Colombia constituyen un recurso que día a día adquiere mayor importancia, puesto que son reconocidas tanto por ser fuentes alternas de aprovechamiento en cuencas con acceso limitado de aguas superficiales, como por su influencia en obras civiles, túneles, carreteras y proyectos mineros, entre otros. Sin embargo, la dinámica de flujos de aguas subterráneas no ha sido estudiada de manera considerable, por eso, es necesario generar bases que unifiquen la información y sirvan como apoyo para los procesos de investigación, y así mismo se haga una mejor gestión del recurso hídrico[13].

Dicho esto, el presente trabajo tiene como objetivo principal, evaluar la vulnerabilidad hidrogeológica del acuífero Guadalupe en el municipio de Subachoque, Cundinamarca, con la ejecución del modelo DRASTIC®, realizando una compilación de información necesaria para evaluar los siete parámetros establecidos y de la misma manera la unidad hidrogeológica; cada una de estas variables fueron desarrolladas y evaluadas por medio de mapas temáticos, los cuales se ponderaron según lo establecido en la metodología, esto, con el fin de realizar el álgebra de mapas y obtener un mapa final en donde se representa el índice de vulnerabilidad, con lo cual se realizó el análisis de los resultados adquiridos para obtener herramientas sistemáticas para el avance de una gestión adecuada y sostenible del recurso hídrico subterráneo, con el fin de garantizar la oferta hídrica para la región, al establecer el correcto desarrollo del ordenamiento territorial, por medio de la evaluación del estado y la dinámica del sistema [14][15].

Como efecto se espera que la metodología pueda ser desarrollada en otras partes del territorio colombiano ampliando así, el conocimiento de los acuíferos de la región, su importancia y las actividades a realizar para conservar y proteger el recurso hídrico[16].

2. Objetivos

2.1. General

Evaluar la vulnerabilidad del acuífero Guadalupe a la contaminación en el municipio de Subachoque Cundinamarca con la implementación del modelo DRASTIC.

2.2. Específicos

- Valorar la unidad hidrogeológica a partir de la recopilación de información necesaria, para la evaluación del mismo.
- Estimar el comportamiento de las variables consideradas por el modelo DRASTIC ®.
- Determinar la ponderación de cada una de las variables de entrada por el modelo DRASTIC ®.
- Interpretar los resultados obtenidos a partir de mapas temáticos desarrollados con la metodología definida.

3. Marco Teórico

3.1. Evaluación de vulnerabilidad hidrogeológica

El término de vulnerabilidad no tiene una definición ampliamente reconocida o aceptada, a pesar de que cuenta con casi tres décadas de utilización, no obstante, la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH), por su parte, emplea y recomienda que el término de vulnerabilidad sea definido, como una propiedad intrínseca de un sistema hidrogeológico que depende de la susceptibilidad del sistema a impactos de origen natural y humano. Es preciso destacar que la caracterización de la vulnerabilidad es una aproximación cualitativa y no cuantitativa, es decir, que se puede obtener diferentes resultados según el método que se emplea al acuífero, por lo tanto, los resultados para un mismo acuífero pueden ser diferentes y su validez es relativa. En Colombia, la escogencia de la metodología es limitada debido a la escasez de información hidrogeológica.

La vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación se realiza a través de la evaluación de tres factores principales:

- La capacidad de atenuación de la carga contaminante que ocurre en el suelo, en la zona saturada y en la no saturada.
- La resistencia o la inaccesibilidad en el sentido hidráulico a la penetración de los contaminantes.
- Los factores externos que puedan facilitar o retardar el impacto de las cargas contaminantes, como la pendiente del terreno y la recarga del acuífero.

Por otro lado, la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación generalmente se clasifica desde baja, media, alta, muy alta, hasta extrema. Los resultados de esta evaluación se suelen presentar en mapas temáticos, los cuales zonifican un territorio en áreas de diferente aptitud potencial para un propósito específico, es decir mapas orientados a usos u objetivos concretos. Estos resultados deben ser articulados con los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas – POMCA y los Planes de Ordenamiento Territorial –POT, para así garantizar la protección de los sistemas acuíferos[12].

La evaluación de vulnerabilidad frente a contaminación debe estar articulada con los modelos hidrogeológicos conceptuales, los cuales son representaciones simplificadas de un sistema complejo, que permite conocer la estructura y dinámica de las aguas, su vulnerabilidad y el estado actual, permitiendo analizar y prevenir inundaciones, manejar hipótesis con cierto grado de confianza para la toma de decisiones, ya sea en la ordenación del territorio en torno a los ríos o

exigir criterios de diseño en obras de infraestructura capaces de soportar y funcionar adecuadamente en situaciones de riesgo[6].

Actualmente, existen diversos métodos de evaluación de vulnerabilidad, aunque es importante resaltar que, en Colombia, la selección de la metodología de la evaluación de vulnerabilidad frente a contaminación es limitada debido a la escasez de información hidrogeológica.

Desarrollada la evaluación de vulnerabilidad a contaminación, se analiza el mapa temático resultante tomando en consideración las características intrínsecas del acuífero y de los riesgos ambientales generados por actividades antropogénicas a las que se encuentran expuestas las aguas subterráneas; entre estas últimas se pueden destacar:

- Derrame o fuga de sustancias tóxicas que posteriormente se infiltra.
- Sobreexplotación del acuífero poniendo en riesgo la recarga y funcionamiento del mismo.
- Inadecuado mantenimiento de los sistemas de extracción de los pozos.
- Eliminación, impermeabilización o urbanización de las zonas de recarga de los acuíferos.

Se debe resaltar que una vez contaminada el agua subterránea, su mantenimiento y limpieza es muy complicada por su difícil acceso, generando un foco de contaminación y el agotamiento del recurso[17].

3.2. Métodos de evaluación de la vulnerabilidad

De acuerdo con la cantidad de información, la calidad y el nivel de detalle deseado, al realizar proceso de evaluación de vulnerabilidad hidrogeológica, se establecen cuatro métodos o modelos generales, de los cuales surgen las diferentes metodologías utilizadas a nivel mundial, de esta manera tenemos los siguientes métodos básicos:

1. Modelos de simulación: usan ecuaciones numéricas que simulan los procesos de transporte por los que se rigen los contaminantes. Son utilizados para la evaluación de la vulnerabilidad específica.
2. Métodos estadísticos: los métodos estadísticos son utilizados para cuantificar la vulnerabilidad de la contaminación del agua subterránea, determinando la dependencia o la relación estadística entre la contaminación y las condiciones ambientales observadas, que pueden o no caracterizar vulnerabilidad y las actividades relacionadas con el uso del

suelo, que sean fuentes potenciales de la contaminación (p.e. uso del fertilizante y ocurrencia séptica del tanque). Una vez un modelo de esta dependencia o de la relación se ha desarrollado con análisis estadístico, la probabilidad de la contaminación puede ser evaluada.

3. Métodos de superposición e índices (o paramétricos): están basados en la combinación de diferentes parámetros (litología, suelo, espesor de la zona no saturada, etc.), y se utilizan para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca. Cada parámetro es puntuado cuantitativamente y se les pueden asignar distinto valor de ponderación para determinar el resultado final que es un índice numérico de vulnerabilidad (iV). Para un método n de parámetros P y n factores de ponderación fP, el índice de vulnerabilidad iV se calcula como:

$$iV = \sum_{j=1}^n fP_j \times P_j$$

Mediante la obtención de este valor iV y de acuerdo con el método usado, la vulnerabilidad de los acuíferos se clasifica desde baja, media, alta, muy alta y hasta extrema, definidos en la Tabla 1.

Tabla 1: Definición Práctica de las clases de vulnerabilidad

CLASE DE VULNERABILIDAD	Definición
Extrema	Vulnerable a la mayoría de los contaminantes con impacto rápido en muchos escenarios de contaminación
Alta	Vulnerable a muchos contaminantes (excepto a los que son fuertemente absorbidos o fácilmente transformados) en muchos escenarios de contaminación
Moderada	Vulnerable a algunos contaminantes solo cuando son continuamente descargados o lixiviados
Baja	Solo vulnerable a contaminantes conservativos cuando son descargados en forma amplia y continua durante largos periodos de tiempo
Despreciable	Presencia de capas confinantes en las que el flujo vertical (percolación) es insignificante

Fuente:[12]

4. Ambientes Hidrogeológicos: evalúan la vulnerabilidad de grandes ambientes hidrogeológicos en términos cualitativos, utilizando una

superposición de mapas temáticos. Es aplicable cuando la información básica específica es inadecuada o escasa[12].

3.3. DRASTIC

El modelo DRASTIC® es un modelo empírico desarrollado Aller et al (1987) para la Environmental Protection Agency, EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos); fue creado para evaluar la capacidad de contaminación de los acuíferos en Estados Unidos, por medio de una valoración DELPHI1, una junta de expertos se encargaron de asignar los rangos y valores a las variables para áreas mayores de 100 acres, 40, 46 Hectáreas, esto es debido a que los contaminantes varían ampliamente en sus características de movilidad y mitigación en el ambiente.

DELPHI, es un método de estructuración de un proceso de comunicación grupal, que es efectivo a la hora de permitir a un grupo de individuos, como un todo, tratar un problema complejo.

El método optimiza el uso de datos disponibles y cuenta con dos grados partes: La designación de unidades denominadas configuraciones hidrogeológicas y la superposición de un sistema de clasificación relativo llamado DRASTIC®. Los entornos hidrogeológicos incorporan factores utilizados para inferir el potencial de contaminación de agua subterránea [3].

Debido a las limitaciones que presentaba el modelo, no se proyectó como un modelo espacial en sus inicios, sin embargo, a su modo de evaluación se puede estandarizar una representación gráfica, en consecuencia, el modelo se lleva a cabo asumiendo algunos supuestos y haciendo evaluación únicamente de acuíferos libres, sin embargo, en el desarrollo del mismo se realizan algunos ajustes para el caso de acuíferos confinados y semiconfinados. Los supuestos aceptados para el desarrollo DRASTIC® son:

- El contaminante se introduce desde la superficie.
- El contaminante se infiltra en el acuífero por la precipitación.
- El contaminante tiene la misma movilidad que el agua y el área de evaluación es mayor de 100 acres.

DRASTIC® se realiza como una guía y no como un modelo representativo de la zona, por lo cual, los factores pueden ser de carácter subjetivo, ya que es ajustado por el desarrollador, esto en consecuencia de los datos disponibles.

El índice de vulnerabilidad es el resultado de la suma de las variables que se considera en la metodología DRASTIC®, las cuales se describen a continuación[3]:

3.3.1. (D) Depth water / profundidad del nivel freático

El nivel freático es una expresión que presenta importancia al determinar la profundidad bajo el nivel del suelo donde los espacios están llenos de agua y aire, por el cual el contaminante debe viajar antes de impactar el acuífero, determinando en primer lugar que la profundidad proporciona mayor oportunidad para generar oxidación, además de que permite definir el tiempo de contacto con él y aumentará la posibilidad de atenuación del contaminante. Para la variable de profundidad del nivel freático, el rango va desde 0 a más de 30.5 metros de profundidad considerando que después de 30.5 metros mantiene el mismo valor, como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2: Rangos y puntuaciones para profundidad (D)

FACTORES DE VALORACIÓN	
VARIABLE	VALORACIÓN
D (profundidad, m)	Dr
0-1,5	10
1,5 – 4,6	9
4,6 – 9,1	7
9,1 – 15,2	5
15,2 – 22,9	3
22,9 – 30,5	2
> 30,5	1

Fuente:[3],[15]

3.3.2. (R) Net recharge / recarga neta

Este parámetro indica la cantidad de agua por unidad de área que ingresa a la superficie del suelo y recarga el nivel freático, debido al lavado de la precipitación dicha recarga es aplicable para el transporte de contaminante de forma vertical y horizontal hasta el nivel freático y el acuífero, respectivamente, por lo que a mayores valores de recarga neta toman mayores valores de movilidad del contaminante por parte del flujo de recarga. Adicionalmente, la cantidad de agua

dispuesta en la zona vadosa y zona saturada es controlada por este parámetro[18]. La recarga neta medida en milímetros desde 0 a más de 254 milímetros de recarga, con los valores que se muestra en la tabla 3, mostrando una gran amplitud de dichos rangos[3].

Tabla 3: Rangos y puntuaciones para recarga neta (R)

FACTORES DE VALORACIÓN	
VARIABLE	VALORACIÓN
R (recarga, mm)	Rr
0 – 50	1
50 – 103	3
103 – 178	6
178 – 254	8
> 254	9

Fuente:[3],[15]

3.3.3. (A) Acuífero media / litología del acuífero

La litología hace referencia al medio rocoso y no consolidado en la cual se encuentra el recurso hídrico, que sirve como acuífero, por lo que en esta medida se tiene en cuenta las características de porosidad, tamaño del grano, permeabilidad y cantidad de fracturamiento de la roca[19], por lo tanto, el agua es retenida por acuíferos en los espacios porosos de rocas granulares y en las fracturas de rocas no granulares o no clásticas.

En ese orden de ideas, la litología tiene importancia en el control principal sobre la ruta que pueda tomar el acuífero está influenciado por la fracturación y las series interconectadas generando un flujo y acceso con mayor facilidad, por lo cual, mientras mayor sea el tamaño del grano y la cantidad de fracturas, mayor será la permeabilidad y por ende menos la capacidad de migración de los medios con relación al contaminante. Los rangos están definidos por las litologías más comunes con valores que van desde 2 a 10, como se muestra en la tabla 4[3].

Tabla 4: Rangos y puntuaciones de litología del acuífero (A)

FACTORES DE VALORACIÓN		
A (LITOLOGÍA DEL ACUÍFERO)	VALORACIÓN Ar	VALORACIÓN TÍPICO Ar
Lutita masiva	1-3	2
Metamórfica/Ígnea	2-5	3
Metamórfica/Ígnea meteorizada	3-5	4
Arenas y gravas de origen glaciár	4-6	5
Secuencias de arenisca, caliza y lutitas	5-9	6
Arenisca masiva	4-9	6
Caliza masiva	4-9	6
Arena o grava	4-9	8
Basaltos	2-10	9
Caliza kárstica	9-10	10

Fuente:[3]

Dado a que la evaluación de este parámetro consta de un rango, para definir un valor o una capa en específico, se establecen las siguientes definiciones para cada uno de las variables:

- **Lutita masiva:** están conformadas por pequeñas cantidades de agua, así mismo se constituyen por partículas de arcilla y limo; son consideradas las rocas de grano más fino dentro del grupo de rocas sedimentarias[20].
- **Roca metamórfica/ígnea:** tipo de roca con poca firmeza, están compuestas por varios fragmentos de roca, cuentan con baja porosidad y rendimiento de agua[20].
- **Metamórfica/Ígnea meteorizada:** material no consolidado, denominado regolito o saprolito que tienen porosidad primaria, con lo que la contaminación potencial está influenciada por el porcentaje de arcilla presenta, durante mayor sea el contenido de esta, menor el potencial de contaminación[20].

- **Arenas y gravas de origen glaciario:** compuesta por fragmentos de roca de arenas, arcillas y limos de baja permeabilidad, componen unos lechos no consolidados o semiconsolidados. Generan poco rendimiento de los pozos a causa de su baja permeabilidad[20].
- **Secuencias de arenisca, caliza y lutitas:** capas delgadas de una secuencia de rocas sedimentarias que tienen una porosidad primaria, su factor o característica importante es el nivel de fracturación[20].
- **Arenisca masiva:** están conformados por lechos de roca arenisca consolidada, cuentan con porosidad tanto primaria como secundaria (5 a 35%) así mismo tiene depósitos en secuencia de piedra caliza, pizarra y arenisca[20].
- **Caliza masiva:** su característica principal son los depósitos de mayor potencia que los de la piedra arenisca, por lo tanto, está conformado de roca caliza o dolomita consolidada. Tienen 25% menos de arcilla y 50% más de calcita[20].
- **Arena o grava:** es una mezcla de que contiene pequeñas cantidades de materiales finos, con diámetro de partículas visibles, generalmente se dan en terrenos secos; cuentan con ligera cohesión, por lo tanto, pueden erosionar fácilmente por el viento[20].
- **Basalto:** es una roca volcánica compuesta por formaciones de roca ígnea extrusiva con fracturación y porosidad vesicular. Su potencial de contaminación depende de la cantidad de aberturas interconectadas[20].
- **Caliza karstica:** surge como un resultado de varios procesos de meteorización química del agua con las rocas carbonatadas, por ello, cuenta con el mayor potencial a causa de las cavidades resultantes de la disolución de la piedra caliza[20].

3.3.4. (S) Soil media / tipo de suelo

En el modelo DRASTIC®, el tipo de suelo es considerado como la parte superior de la tierra y se realiza con el indicio de la medición desde la superficie hasta una profundidad de 6 pies, analizando los posibles horizontes que contenga la zona de estudio, esto tiene un impacto significativo en la cantidad de recarga que puede infiltrarse a través de las capas del suelo, por ende, la habilidad con la que el contaminante se mueve verticalmente dentro de la zona vadosa. En la siguiente tabla se definen los rangos de las diferentes granulometrías que se pueden encontrar desde grano grueso a muy fino, siendo la arcilla la de menor ponderación[3].

Tabla 5: Rangos y puntuaciones para tipo de suelo (S)

FACTORES DE VALORACIÓN	
VARIABLE	VALORACIÓN
S (Tipo de suelo)	Sr
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Agregado arcilloso o compactado	7
Arenisca margosa	6
Marga	5
Limo margoso	4
Arcilla margosa	3
Estiércol-cieno	2
Arcilla no compactada y no agregada	1

Fuente:[3]

Dado a que la evaluación de este parámetro consta de un rango, para definir un valor o una capa en específico, se establecen las siguientes definiciones para cada uno de las variables:

- **Delgado o ausente:** se considera ausente cuando el perfil del suelo tiene un grosor menor a 10 pulgadas, ello lo hace ineficiente para atenuar la contaminación, es decir, se vuelve un material vulnerable[20].
- **Grava:** material presentes en suelos que tiene alta permeabilidad, sus partículas son superiores a 2 mm de tamaño, pero estos granos al estar húmedos no se apelmazan[20].
- **Arena:** sustancia conformada por partículas de un tamaño de 2mm, cuentan con buen drenaje dado que están húmedas se apelmazan[20].
- **Turba:** está conformado por acumulación de grandes cantidades de restos orgánicos que se encuentran parcialmente descompuestos, como por ejemplo, turba orgánica[20].

- **Agregado arcilloso o compactado:** su característica es contener arcilla de montmorillonita, por ello se expande al hidratarse generando agrietamiento cuando se seca. Cuenta con alto nivel de contaminación y baja permeabilidad del material[20].
- **Franco arenoso:** contiene un mayor potencial de contaminación porque cuenta con un alto porcentaje de arena; tiene pocas reservas de nutrientes. Se compone del 15-50% de solo arena [20].
- **Franco:** sustancia que cuenta con alta productividad agrícola, su textura se compone de 25-50% de limo, de 0-50% arena y de 7-27% arcilla[20].
- **Franco limoso:** su conformación cuenta de 0-50% de arena, 50-85% limo y de 12-27% de arcilla. Tiene gránulos de tamaño intermedio y un evidente porcentaje más alto de limo que de arena o arcilla[20].
- **Franco arcilloso:** cuenta con una textura relativamente fina, baja permeabilidad, bajo potencial de contaminación. Contiene un 27-40% de arcilla y un 20-45% de arenas[20].
- **Estiércol:** proviene de materia orgánica, cuenta con alta carga mineral y de cenizas, baja cantidades de fibra vegetales, es utilizado como fertilizantes, por lo tanto, tiene potencial de reducción frente a la contaminación[20].
- **Arcilla no compactada o no agregada:** se caracteriza por estar formado por ilitas o arcilla de caolinita, por lo cual no se expande ni se contrae cuando se le agrega agua, esto evita la formación de permeabilidad secundaria. Pero cuenta con un alto potencial de contaminación por el agrietamiento[20].

3.3.5. (T) Topografía relieve

La topografía hace referencia a la pendiente del relieve, en valores de porcentajes; este parámetro se tiene en cuenta la dirección de agua o contaminante y la velocidad de flujo según la pendiente, es decir, controla la probabilidad de que algún contaminante tenga mayor o menor infiltración, con valores que se presenta en la tabla 6[3].

Tabla 6: Rangos y puntuaciones para topografía (T)

FACTORES DE VALORACIÓN	
VARIABLE	VALORACIÓN
T (pendiente %)	Tr
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
>18	1

Fuente:[3]

3.3.6. (I) Impact / impacto en la zona vadosa

La zona no vadosa determina la atenuación del material debajo del horizonte del suelo y arriba del nivel freático, es decir, representa la capacidad del suelo para obstaculizar el transporte vertical, sin embargo, se debe tener en cuenta que, cuando se evalúa a un acuífero confinado el “impacto” de la zona no vadosa se amplía para incluir tanto la zona no vadosa como cualquier zona saturada que cubre el acuífero. El modelo DRASTIC® pondera este parámetro como lo establece la siguiente tabla[3]:

Tabla 7: Rangos y puntuaciones para naturaleza de la zona no saturada (I)

FACTORES DE VALORACIÓN		
I (NATURALEZA DE LA ZONA NO SATURADA)	VALORACIÓN Lr	VALORACIÓN TÍPICO Lr
Capa confinante	1	1
Cieno-arcilla	2-6	3
Lutita	2-5	3
Caliza	2-7	6
Arenisca	4-8	6
Secuencias de arenisca, caliza y lutita	4-8	6

Arena o grava con contenido de cieno y arcilla significativo	4-8	6
Metamórfica/Ígnea	2-8	4
Grava y arena	6-9	8
Basalto	2-10	9
Caliza kárstica	8-10	10

Fuente[3]:

Dado a que la evaluación de este parámetro consta de un rango, para definir un valor o una capa en específico, se establecen las siguientes definiciones para cada uno de las variables.

- **Capa confinante** : formación que se extiende por encima o por debajo de un acuífero mucho más permeable, restringiendo el flujo en el acuífero[21].
- **Cieno/arcilla:** referente a un depósito con contenido de limos y arcillas, que representa una barrera para retardar el libre flujo de líquidos, además de presentar una baja permeabilidad de acuerdo a la cantidad de arcilla presente disminuyendo el potencial de contaminación a mayor cantidad de arcilla[22].
- **Metamórficas /ígneas:** consolidados de roca de origen metamórfico o ígneo que no contienen porosidad primaria, permitiendo la movilidad por fracturación siendo la contaminación una función del grado de fracturación[23].
- **Lutita:** lechos de roca de arcilla consolidada con posibilidad de fracturarse[20].
- **Caliza:** roca sedimentaria compuesta mayormente por carbonato de calcio, puede contener pequeñas cantidades de arcilla, cuarzo; la mayoría de las calizas se forman en aguas profundas[20].
- **Arenisca** : rocas de arena consolidado que contiene porosidad primaria y 33 secundaria[20].
- **Secuencias de arenisca, caliza y lutita:** hace referencia a capas delgadas de rocas sedimentarias que contiene porosidad primaria, pero aun así, prima el nivel de fracturación para la evaluación[20].

- **Arena o Grava con contenido de cieno y arcilla significativo:** mezclas no consolidadas de arena y grava con contenidos de materia orgánica, por lo general con alto contenido de arcilla que reducen la permeabilidad de estos depósitos[20].
- **Grava y arena:** mezclas no consolidadas de partículas de tamaño arena y grava con pequeñas cantidades de granos más finos, los depósitos bien clasificados tienen un potencial de contaminación más alta[20].
- **Basaltos:** lecho de roca ígnea extrusiva consolidada, con planos de estratificación y porosidad vesicular, la polución está influenciada por el número y cantidad de aberturas interconectadas, presentando pocas posibilidades de atenuación una vez que el contaminante entra en el sistema de fracturas[20].
- **Caliza kárstica:** caso especial de piedra caliza, donde esta se ha disuelto hasta el punto de formar grandes cavidades y fracturas abiertas interconectadas generando un nivel alto de contaminación durante mayor sea el área abierta[20].

3.3.7. (C) Hydraulic conductivity/conductividad hidráulica

El parámetro de conductividad hidráulica determina la cantidad de agua que atraviesa el acuífero por unidad de tiempo y por unidad de sección, es decir, la velocidad con que el agua segregará un gradiente hidráulico y a su vez con la que un contaminante se transportará hasta el acuífero, dicho esto, la conductividad hidráulica es controlada por la cantidad y la interconexión entre espacios vacíos dentro del acuífero que puede ocurrir como consecuencia de factores como la porosidad intergranular y fracturamiento[3].

Tabla 8: Rango y puntuación de conductividad hidráulica (C)

FACTORES DE VALORACIÓN		Cr
C (CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA)	cm/s	
0,04 – 4,08	$4,6 \times 10^{-5} - 4,7 \times 10^{-3}$	1
4,08 – 12,22	$4,7 \times 10^{-3} - 1,4 \times 10^{-2}$	2
12,22 – 28,55	$1,4 \times 10^{-2} - 3,4 \times 10^{-2}$	3
28,55 – 40,75	$3,4 \times 10^{-2} - 4,7 \times 10^{-2}$	6
40,75 – 81,49	$4,7 \times 10^{-2} - 9,5 \times 10^{-2}$	8

> 81,49	>9,5 x10 ⁻²	10
---------	------------------------	----

Fuente:[3]

3.3.8. Ponderación

Dentro del modelo se utilizan una serie de combinaciones, ponderaciones y valores para establecer el grado de vulnerabilidad que es reflejado en un valor numérico denominado DRASTIC® índice, o índice DRASTIC®, en la cual, prevalece las áreas con mayor riesgo de contaminación. Los resultados pueden variar entre 23 (mínima) y 230 (máxima), obteniendo los rangos de vulnerabilidad de la tabla 9[3].

Tabla 9: Valores calificación final DRASTIC

GRADOS DE VULNERABILIDAD – D R A S T I C	
VULNERABILIDAD GENERAL	
GRADO	VULNERABILIDAD
Muy bajo	23-64
Bajo	65-105
Moderado	106-146
Alto	147-187
Muy alto	188-230

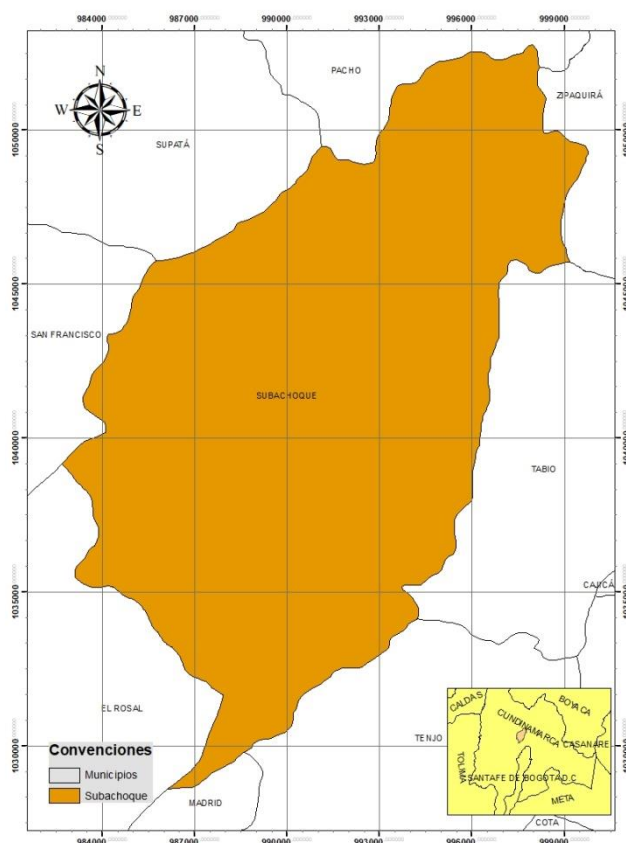
Fuente:[3]

4. Marco de referencia

4.1. Área de estudio

El área de estudio abarca el municipio de Subachoque el cual se encuentra en la Provincia de Sabana Occidente ubicado en el departamento de Cundinamarca, Subachoque está situado a 4 grados, 56 minutos de latitud norte y 74 grados, 11 minutos de longitud sobre el meridiano de Greenwich, encontrándose ubicado al noroccidente de Bogotá. El municipio limita al oriente con Tabio y Tenjo, al norte con Zipaquirá, al occidente con San Francisco, Pacho y Supatá, al sur con Madrid y el Rosal[24].

Figura 1: Delimitación del municipio de Subachoque



Fuente: Autores

El municipio cuenta con una extensión total de 211,53 Km² los cuales 8,13 Km² corresponde al área urbana y 210,71 km² al área rural. La altitud de la cabecera municipal es de 2663 m.s.n.m.

4.2. Clima

Subachoque se encuentra ubicado a 2663 m.s.n.m, a partir de información del IDEAM se determina que el municipio se caracteriza por tener clima frío semihúmedo ya que tiene una temperatura promedio de 11°C a 17°C. Presenta una precipitación promedio anual de 815,243 mm, en el mes más seco se dio una precipitación de 32,472 mm en el mes de mayo y la mayor precipitación alcanzada fue de 107,844 mm para el mes de febrero.

4.3. Geología

Subachoque se encuentra ubicado sobre una zona en la cual hay presencia de estructuras del cretáceo hasta el cuaternario, además de largos sinclinales en los valles mayores y largos y estrechos anticlinales en las serranías entre estos, con fallas inversas bordeando muchos de los anticlinales con fallas normales y de rumbo cortando las anteriores[25][26].

Dentro del municipio encontramos las siguientes formaciones:

- Formación guaduas (Cretáceo-Terciario): está compuesta por arcillolitas grises compactas, bien estratificadas, arcillolitas carbonáceas, bancos de arenisca, arcillolitas abigarradas, y numerosos mantos de carbón situados hacia la parte inferior y media de la Formación. Los sedimentos del Guaduas tienen un espesor variable entre unos 250 m y 1200 m. Se ha subdivido en tres a cinco niveles litoestratigráficos con validez dentro de la respectiva sub-cuenca carbonífera, con base en la presencia de gruesos bancos de arenisca cuarzosa de grano variable[26], [27].
- Formación seca: está compuesta por Arcillolita y lodolita pardo grisáceo a rojo, con nódulos de caliche, intercalaciones de arena de cuarzo, de grano fino en capas cubetiformes[26], [27].
- Grupo Villeta (Cretáceo Medio a Superior): el grupo Villeta está constituido por dos formaciones denominadas formación frontera y conejo, la formación frontera consta de unos 40 m de calizas y limolitas silíceo-calcáreas, negras, en capas delgadas, muy fosilíferas, con frecuentes nódulos calcáreos. El resto de la sucesión total, de 1300 m de espesor, son lutitas negras finamente laminadas con ocasionales intercalaciones de areniscas y calizas en estratos de 3 a 5 m de espesor. La formación conejo se encuentra constituida por una sucesión de arcillolita y lodolita, algo calcárea, gris con esporádicas capas medias de limolita, arenita de cuarzo de grano fino y caliza biomicrítica[26], [27].
- Formación labor y tierna: se encuentra constituida por arenita de cuarzo, grano fino a medio en capas gruesas[26], [27].

- Formación plaeners: se encuentra constituida por limolita silícea y chert, en capas delgadas a medias, con intercalaciones de lodolita y arenita de cuarzo de grano fino en capas delgadas a medias[26], [27].
- Formación arenisca dura: se encuentra constituida por arenita de cuarzo de grano fino, en capas delgadas a muy gruesas y con intercalaciones de limolitas silíceas[26], [27].
- Formación Bogotá: está compuesta casi exclusivamente por arcillolitas abigarradas (grises, violáceas, moradas y rojas), bien estratificadas, con algunos bancos de areniscas micáceas grises de grano fino hacia la parte superior de la unidad. Tiene un espesor variable entre 800 m y 2000 m[26], [27].

Por otro lado encontramos las unidades cronoestratigraficas las cuales son divisiones de cuerpos de roca, por lo que sirven de base para formar la escala temporal geológica. En el municipio encontramos las siguientes unidades:

- b6k6-Stm: Shales, calizas, arenitas, cherts y fosforitas
- E1-Sc: Conglomerados intercalados con arenitas de grano medio a grueso y lodolitas carbonosas
- k1k6-Stm: Shales, calizas, fosforitas, cherts y cuarzoarenitas. Predominio de facies finas al norte del Cocuy y facies más arenosas al sur.
- k6E1-Stm: Arcillolitas rojizas con intercalaciones de cuarzoarenitas de grano fino. Mantos de carbón a la base
- Q-al: Depósitos aluviales y de llanuras aluviales
- Q-ca: Abanicos aluviales y depósitos coluviales
- Q1-l: Arcillas, turbas, y arcillas arenosas con niveles delgados de gravas. Localmente, capas de depósitos de diatomeas.

4.4. Hidrografía

El municipio de Subachoque hace parte de la cuenca media del río Bogotá, su principal fuente de abastecimiento es el río Subachoque el cual nace en las montañas al occidente de la cuenca del río Frío, a una altitud de 3450 m.s.n.m. El río recorre los municipios de Subachoque (65%), Madrid (21.9%), Facatativá (10.6%), Funza (1.4%) y Mosquera (1.0%)[28].

Su área de drenaje es de 376.27 Km² hasta la población de Madrid y entre sus afluentes encontramos las siguientes quebradas[25]: la mina, abra, negra, el higuerón, la piñuela, el aliso, cañizal, la angostura, el alivo, el aliso, pino alto, el cedro, el choque, el bobal, buenos aires, pozo azul, el piloteo, el salitre, el mapa, paramillo, quesero, quebraditas, lomalta, charri, nemice, colorados, el charco, la cabaña, casa blanca, la chorrera, carizal, el molino, santa barbara, los cerezos, el ható, el cajón, la hierbabuena, tibagota[25],[28].

Entre los parámetros físicos de la cuenca del río Subachoque se encuentra:

Tabla 10: Parámetros físicos de la cuenca Subachoque

Parámetro	Unidad	Valor
Tamaño	Km ²	376.27
Perímetro	Km	110.85
Longitud del cauce principal	Km	156.67
Pendiente del cauce	%	1.58
Elevación media	m.s.n.m	2773
Número de cauces	Unidad	72
Longitud cursos de agua	Km	239.79
Densidad ríos	Ríos/Km ²	0.19
Densidad drenaje	Km/Km ²	0.64

Fuente:[28]

4.5. Hidrogeología

En el municipio de Subachoque, entre sus formaciones encontramos rocas con características de porosidad primaria y secundaria lo cual permite el almacenamiento de agua subterránea en los estratos. Entre sus características hidráulicas se estiman transividades de 15-19 m² /día, capacidades específicas de 0.20 l/s/m y caudales de 2-35 l/s[29].

4.6. Dinámica de flujo y recarga

Para la dinámica de flujo y recarga del municipio, se presenta que para el flujo del recurso hídrico subterráneo correspondiente al acuífero cuaternario, está siendo monitoreado por pozos tanto en el municipio de Subachoque como en Madrid.

En los pozos se presentan fluctuaciones, los cuales varían según el sector donde este localizado, están diferenciados por la forma de las isopiezas que evidencia una discontinuidad lateral de los acuíferos someros en dos sectores de la cuenca; un primer sector, ubicado hacia el norte de la cuenca, en un polígono formado entre los cascos urbanos de los municipios de El Rosal y Subachoque y el sector sur de los Cerros de Tenjo, cuyas líneas de flujo se dirigen hacia el centro del sector, creando un cono de depresión bastante pronunciado en este sitio; un segundo sector que constituye la parte más sur de la cuenca, donde los flujos para

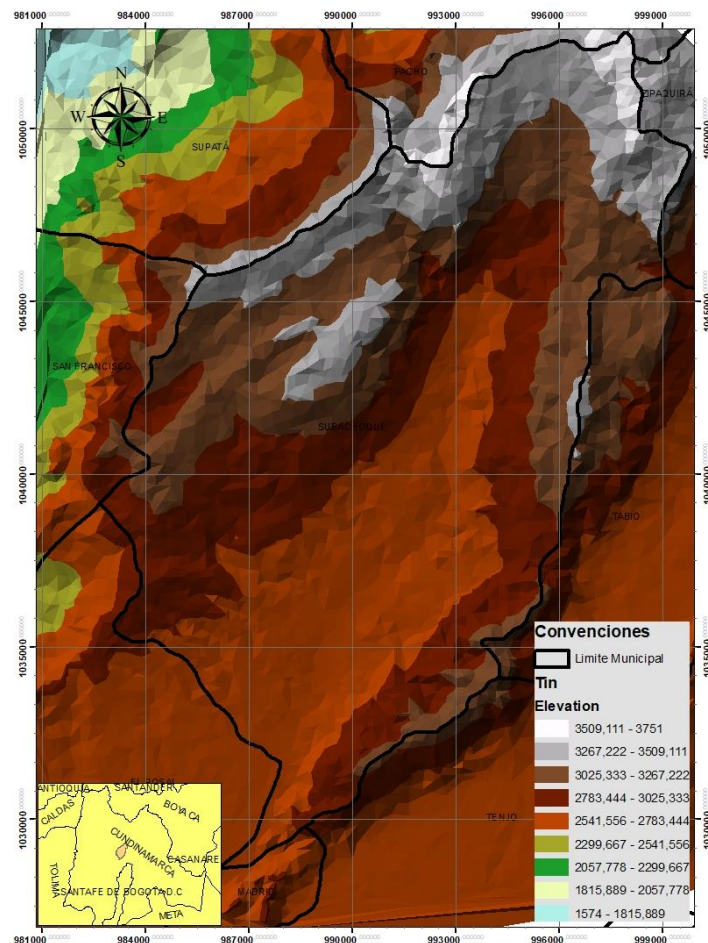
el acuífero Cuaternario se hallan igualmente dominados por los bombeos de los pozos y forman también un cono de depresión aunque no tan pronunciado como el sector norte[30].

4.7. Unidades de paisaje

El municipio de Subachoque presenta dos zonas muy definidas las cuales son planicie y montaña. Como se puede observar en la figura 2 al occidente del municipio se observa una cordillera denominada el tablazo y continuo a esta encontramos la de Nimice y de El Guamal, con su pico más alto, “La Soldadesca”.

Al oriente encontramos el cerro de Juaica y sus picos más elevados la “Pedregosa” y el “Boquerón de la Magdalena”. Mientras en la zona de planicie está conformada por áreas planas y onduladas, estas están incrustadas entre las cordilleras, así conformando el Valle de Subachoque.

Figura 2: Morfología de la superficie del municipio de Subachoque



Fuente: Autores

4.8. Aspectos socioeconómicos

Subachoque maneja condiciones básicas para los habitantes, entre estas encontramos los sectores de:

- Educación: mantiene una total cobertura y calidad en la zonas rurales y urbanas[31].
- Salud: en Subachoque la salud reporta un 42,30% de la población en régimen subsidiado, 46,84% en régimen contributivo y un 10,86% sin afiliación[31].
- Bienestar social: manejan hogares comunitarios, programa de jóvenes rurales, familias en acción y demás[31].
- Cultura: Subachoque cuenta con escuelas en formación en banda sinfónica, iniciación musical, banda marcial, teatro de calle y danzas[31].
- Deporte y la recreación: el municipio cuenta con escuelas de formación en patinaje, futsal, baloncesto, voleibol, gimnasia olímpica y porrismo[31].

Para hablar un poco más del desarrollo económico enfocado en el crecimiento y dinamismo de cuyas actividades generen ingresos con el fin de garantizar la calidad de vida. Es por esto que Subachoque se resalta por tener los sectores del turismo y producción agropecuaria; en las zonas rurales se da la producción agrícola y ganadera[31].

5. Marco legal

Para la presente investigación se tiene en cuenta la base del recurso hídrico en Colombia, específicamente sobre el agua subterránea, por lo cual se desarrolla un marco legal ambiental sobre el recurso del agua, incluyendo el desarrollo de proyectos que sujeten la necesidad del uso de licenciamiento ambiental con relación al desarrollo de estudios sobre el recurso subterráneo y su impacto ambiental.

Por consiguiente, se expone la siguiente tabla con las normas como base de apoyo:

Tabla 11: Marco legal relacionado con el proyecto.

NORMA	DESCRIPCIÓN	RELACIÓN CON LA INVESTIGACIÓN
Decreto 2811 de 1974	Por el cual se dicta el código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.	Se refiere a las medidas de protección necesarias para garantizar la calidad de las aguas subterráneas [32].
Decreto 1541 de 1978	Por el cual se reglamenta la parte III del libro II del decreto ley 2811 de 1974 “De las aguas no marítimas” y parcialmente la Ley 23 de 1973.	Estable que las solicitudes de concesión de agua para usos mineros y petroleros el concesionario está obligado a prevenir la contaminación de las napas de agua subterránea que atraviesa. Cualquier exploración que busque aguas subterráneas requiere permiso del Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente, este permiso no confiere concesión para el aprovechamiento del recurso[33] .

Ley 9 de 1979	Por el cual se dictan medidas sanitarias.	Establece las disposiciones generales de las aguas subterráneas para el correcto aprovechamiento de pozos para abastecimiento público. Así mismo establece recomendaciones para prevenir la contaminación de aguas subterráneas y evitar el efecto purificador de los estratos permeables como efecto de la extracción excesiva de agua subterránea[34].
Ley 99 de 1993	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, re reordena el Sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan Otras disposiciones.	Establece que el IDEAM tendrá que efectuar el seguimiento de las aguas subterráneas y obtener la información Suministrada por el INGEOMINAS. Establece que las corporaciones autónomas regionales tienen entre sus funciones otorgar concesiones para el uso de aguas subterráneas[35].
Ley 373 de 1997	Por la cual se establece el programa para el uso Eficiente y ahorro de agua.	Establece que, para definir la viabilidad del otorgamiento de las concesiones de aguas subterráneas, las corporaciones autónomas regionales y demás autoridades ambientales realizarán estudios hidrogeológicos pertinentes y acciones de protección correspondiente de la zona de recarga[36].

Decreto 1729 de 2002	Por el cual se reglamenta la Parte XIII, Título 2, Capítulo III del Decreto-ley 2811 de 1974 sobre cuencas hidrográficas, parcialmente el numeral 12 del Artículo 5° de la Ley 99 de 1993 y se dictan otras disposiciones	Establece la ordenación de la cuenca para mantener un adecuado equilibrio entre el aprovechamiento económico y la conservación físico-biótica, en especial la protección de zonas de recarga de Acuíferos. Además, se deberá establecer un diagnóstico sobre dicha zona [37].
Decreto 1323 de 2007	Por el cual se crea el Sistema de información del Recurso Hídrico - SIRH	El sistema de información del recurso hídrico SIRH gestionará la información ambiental relacionada con la disponibilidad hídrica, cantidad y calidad de agua de los cuerpos hídricos del país que comprenden las aguas subterráneas[38].
Decreto 4728 de 2010	Por el cual se modifica parcialmente el decreto 3930 de 2010	Establece que el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial expedirá el protocolo para el monitoreo de los vertimientos en aguas superficiales y subterráneas[39].
Acuerdo 042 de 2010	Por el cual se adopta la reglamentación integral para la gestión de las aguas subterráneas en el departamento del Valle del Cauca.	Define el concepto de vulnerabilidad intrínseca de un acuífero a la contaminación, se recomienda los métodos de evaluación (GOD, DRASTIC, DGR), se hacen los requerimientos para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación y se fijan restricciones para el desarrollo de actividades parcialmente contaminantes en áreas cartográficas con vulnerabilidad alta a extrema.

Decreto 1640 de 2012	Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones.	Determina las herramientas necesarias para la ordenación de cuencas Hidrográficas y acuíferos. Establece que los acuíferos son objeto de planes de manejo ambiental y que deben seguir criterios de formulación expuestos en el presente Decreto[1].
----------------------	--	--

Este marco legal permite tener una respectiva orientación para el presente proyecto ya que teniendo en cuenta las medidas necesarias establecidas en la legislación vigente del país se puede garantizar la calidad de las aguas subterráneas y además los procesos para otorgar concesiones de aguas subterráneas. De igual manera, estas referencias sirven como base para que el proyecto sea usado para futuros planes de ordenamiento territorial, políticas públicas en materia ambiental, especialmente en la protección y cuidado de los sistemas acuíferos de Subachoque y sea un complemento de estudio en las aguas subterráneas de la Sabana de Bogotá.

6. Metodología

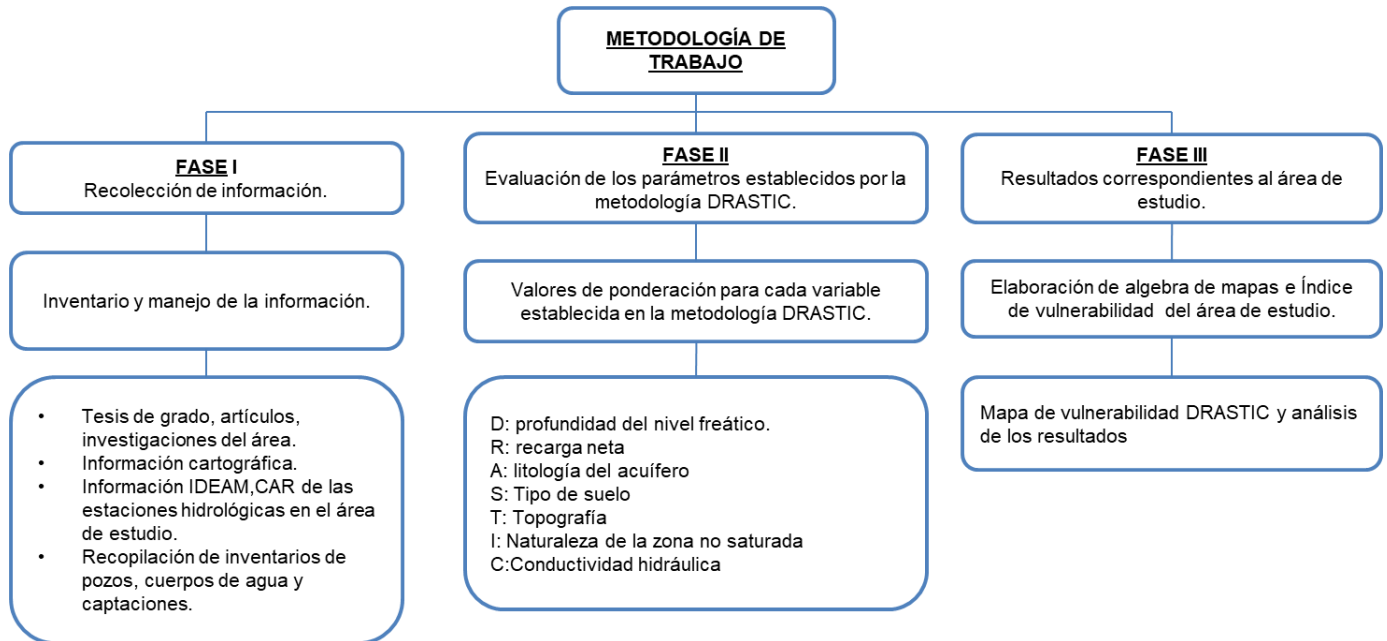
Para llevar a cabo este proyecto, se realizó la recopilación y el análisis de datos, de distintas fuentes bibliográficas tales como estudios de las diferentes entidades gubernamentales, tesis de grado, artículos científicos, esto para, tener una línea base del área de estudio referente a la geología, hidrogeología, meteorología e hidrología para la formulación del modelo DRASTIC®. Después se generó un análisis espacial sobre una plataforma tipo SIG, con diferentes geoprocесamientos, esto con el fin de realizar la ponderación de cada variable indicada en el índice, para finalmente obtener la cartografía de vulnerabilidad del acuífero de Guadalupe en el municipio de Subachoque, con su correspondiente análisis, conclusiones y recomendaciones.

Para realizar los geoprocесamientos se hizo uso de un Sistema de información Geográfico (SIG), sobre la plataforma de ArcGIS 10.2.2®, en la cual se delimitó la información hacía el municipio de Subachoque.

Dado que gran parte del desarrollo de la metodología se realizó por capas, a continuación, se describe el proceso que se ejecutó para cada parámetro del modelo, comprendiendo que el resultado final, es una ponderación realizada por superposición en la plataforma ArcGis 10.2.2®, generando la suma para la calificación del índice de vulnerabilidad.

Para un mejor entendimiento de la metodología, en la figura 3 se puede observar lo explicado anteriormente.

Figura 3: Resumen de la metodología implementada



Fuente: Autores

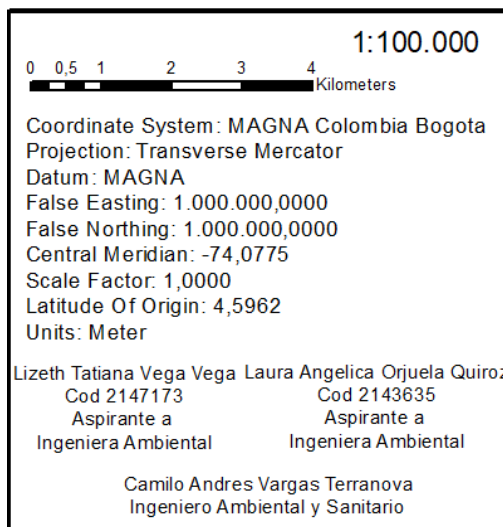
6.1. Valores de ponderación

Para realizar cada mapa temático, fue necesario establecer el sistema de coordenadas de las capas en el software, esto con el fin de trabajar la información en un mismo sistema de referencia teniendo las mismas características geométricas y físicas.

Para el proyecto se implementaron las coordenadas MAGNA-SIRGAS / Colombia Bogotá zone (3116), debido a que estas son de uso adecuado y el datum oficial en Colombia[40][41].

En la figura 4, se puede visualizar la leyenda correspondiente a los mapas que se pueden observar más adelante.

Figura 4: Sistema de coordenadas



Fuente: Autores

6.1.1. (D) profundidad del nivel freático.

La profundidad del acuífero se determinó a partir del inventario de pozos el cual fue solicitado en formato shape a la Corporación autónoma regional de Cundinamarca (CAR), la cual se encarga de monitorear y actualizar el inventario de pozos. El municipio cuenta con 104 pozos, de los cuales se usaron 54 ya que contaban con la respectiva localización geográfica, niveles piezométricos y uso de agua extraída. Los datos de los pozos se encuentran en el anexo N.

Para generar los valores de profundidad a la capa de puntos se hizo uso del software y se realizó una interpolación mediante distancia inversa (IDW), el cual está basado en la inversa de la distancia elevada a una potencia matemática, por lo que los datos más cercanos a la superficie tendrán mayor influencia. Para llevar a cabo la interpolación se siguió la siguiente ruta: ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Interpolation > IDW; generando una capa con valores conforme las distancias desde el suelo hasta la tabla de agua.

Dicho lo anterior, los valores son generados por el software, sin embargo, para evaluar este parámetro con los valores establecidos por la metodología, se realizó una reclasificación del raster obtenido en: ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Reclass > Reclassify, en esta última herramienta se clasifican los valores del índice DRASTIC.

6.1.2. (R) recarga neta

Para el cálculo de la recarga neta, se realizó un balance hídrico bajo la metodología de Thorthwaite, para ello, se hizo una solicitud al IDEAM de las

estaciones no solo del municipio de estudio sino también de municipios aledaños, ya que Subachoque no cuenta con la suficiente información, consiguiente a esto, se realizó el llenado de datos usando como herramienta el software python mediante un código de programación, y con esto, se procedió a realizar el balance de hídrico por medio de Thorthwaite.

Para obtener la ponderación siguiendo el índice DRASTIC, se realizó un mapa en formato shape, identificando las zonas de recarga establecidas en un estudio realizado por el IDEAM y se introdujo los valores de recarga en la tabla de atributos del shape generado en la ruta: Open Attribute Table > Add field > Rr > Editor > Start editing. Finalmente, el mapa fue convertido a formato raster para poder evaluar los resultados obtenidos según la metodología establecida; Para esto se siguió la ruta: ArcToolbox>Conversion Tools> To Raster >poligon to Raster.

6.1.3. (A) litología del acuífero

Para la caracterización de la litología del acuífero, se tomó el mapa de suelos de Cundinamarca en formato shape a escala 1:100000 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y a su vez la información fue corroborada por el estudio realizado en INGEOMINAS para el año 2005 referente a la geología de la sabana de Bogotá.

Ahora bien, para poder clasificar la litología fue necesario modificar la tabla de atributos correspondiente al shape del IGAC esto con el fin de dar las características litológicas según la metodología DRASTIC, de este modo, se siguió la siguiente ruta: Open Attribute Table > Add field > Ar > Editor > Start editing; en cada columna se incluyeron las características litológicas correspondientes a cada polígono del shape según el índice DRASTIC, el resultado fue transformado a formato tipo raster, de la siguiente forma: ArcToolbox>conversion tools> to raster >polygon to raster, esto, para realizar la reclasificación con los valores de ponderación según la metodología descrita en la tabla 4 del presente documento.

6.1.4. (S) Tipo de suelo

Para la identificación de los tipos de suelo característicos del municipio de Subachoque, se tomó el mapa geológico (planchas 227 y 208) del Servicio Geológico Colombiano a escala 1:100.000.

A partir de estas planchas se realizó la respectiva identificación de las formaciones geológicas presentes en el municipio, esto con el fin de reconocer la variedad de tipo de suelo. La información presente en las planchas fue corroborada con otro estudio realizado por INGEOMINAS sobre la geología de la sabana de Bogotá.

Una vez identificadas las formaciones geológicas, se realizó la clasificación de suelos. Se procedió a hacer uso del software en donde se tomó el Shapefile de polígonos de las correspondientes formaciones en cada plancha y se clasificó en los tipos de suelo ya previamente reconocidos.

6.1.5. (T) Topografía

Los valores de pendiente fueron estimados a partir del DEM el cual fue obtenido de la página web de la NASA®. En el software se procedió a realizar el tratamiento correspondiente al DEM, una vez delimitada la zona de estudio se realizó el proceso de evaluación de la pendiente, este el software lo realiza de manera automática por medio de la herramienta slope se encuentra siguiendo la siguiente ruta: ArcToolBox > Spatial Analyst Tools > Surface > Slope.

Después se procedió a realizar la reclasificación de los valores de la pendiente según los valores establecidos en la metodología. Para realizar la reclasificación se empleó la misma ruta descrita para el parámetro D.

Y como último se creó la superficie con el fin de visualizar la distribución espacial de las correspondientes elevaciones del municipio. Primero se creó una capa de puntos que cubriera el DEM del municipio, después se procedió a darle valores de la elevación a estos puntos por medio de la herramienta Extract values to points el cual se encuentra en la ruta: ArcToolBox > Spatial Analyst Tools > Extraction > Extract Values To Points. Y finalmente se crea el TIN por medio de la ruta: 3D Analyst Tools > Data Management > TIN > Create TIN.

6.1.6. (I) Naturaleza de la zona no saturada.

Para la identificación de la zona no saturada se tomó de referencia el Mapa Geológico de Colombia-Cronoestratigrafía, así como los estudios de Geología de la sabana de Bogotá de INGEOMINAS y el volumen de geología y geotecnia de ANI.

A partir de esto se realizó la identificación y clasificación de las unidades cronoestratigráficas presentes en el municipio y se procedió a hacer el uso del software en donde se tomó el Shapefile de los polígonos correspondientes a las unidades del municipio y por último se llevó a cabo la reclasificación de las unidades según los valores establecidas en la metodología DRASTIC®.

6.1.7. (C) Conductividad hidráulica

Para el valor de conductividad hidráulica del municipio de Subacho fue necesario realizar una consulta bibliográfica en donde se encontró y se tomó de referencia la tesis de grado titulada “Análisis de las variaciones de niveles piezométricos del complejo acuífero cuaternario, registrados dentro de pozos profundos, por la CAR, entre 1998 y 2007, en la sabana de Bogotá”.

Con el valor de conductividad se procedió a hacer el uso del software en donde se plasmó este valor en el municipio y después se realizó la reclasificación de este parámetro según la metodología.

6.2. Índice de vulnerabilidad DRASTIC

Finalizadas las siete capas descritas anteriormente, las cuales representan cada parámetro, con la ponderación que establece el índice DRASTIC® y rectificando que cada mapa estuviese en formato raster. Se desarrolló la ecuación para obtener el índice de vulnerabilidad, en donde se utilizó la opción del software álgebra de mapas, ya que es el conjunto de herramientas de cálculo con matrices de datos que permite obtener nuevas capas de información a partir de capas previamente realizadas.

Para la ponderación se utilizó la herramienta de Raster Calculator y Overlay con el fin de comparar ambas herramientas y obtener el índice de vulnerabilidad del acuífero de Guadalupe en el Municipio de Subachoque.

La aplicación para realizar la función se describe en la siguiente ruta: ArcToolbox> Spatial analyst Tools >Map Algebra>Raster Calculator; en la ventana emergente de la calculadora raster, se completan los campos con la siguiente información:

$$\text{DRASTIC} = (D_r \cdot D_w) + (R_r \cdot R_w) + (A_r \cdot A_w) + (S_r \cdot S_w) + (T_r \cdot T_w) + (I_r \cdot I_w) + (C_r \cdot C_w)$$

En donde:

- r: indica factor de clasificación o valoración.
- w: indica factor de ponderación, que cuenta con los siguientes valores:

Tabla 12: Factores de ponderación

Factor de ponderación	Valor
Dw	5
Rw	4
Aw	3
Sw	2
Tw	1
Iw	5

Cw	3
----	---

Fuentes:[3]

Para el caso de la herramienta “overlay”, se realiza con la siguiente ruta ArcToolBox > Spatial Analyst Tools > Overlay > Weighted Sum, sin embargo, es más sencilla al solo introducir las capas de interés y el valor del peso asignado a cada una.

El grado de vulnerabilidad DRASTIC, se establecen en la siguiente tabla

Tabla 13: Grados de Vulnerabilidad DRASTIC

GRADOS DE VULNERABILIDAD – D R A S T I C	
VULNERABILIDAD GENERAL	
GRADO	VULNERABILIDAD
Muy bajo	23-64
Bajo	65-105
Moderado	106-146
Alto	147-187
Muy alto	188-230

Fuente:[3]

7. Análisis de resultados

Los resultados son obtenidos con base a la información recolectada de las distintas entidades y fuentes, por lo que cada parámetro va destacando su significado sobre el desarrollo de la metodología y la importancia sobre el índice de vulnerabilidad del acuífero en la ponderación final. Cabe resaltar que los mapas temáticos desarrollados tienen un mejor detalle para su lectura en los anexos A al N, pero se presenta un pre visualización de los resultados gráficos.

De esta forma se desglosa el resultado general en la composición de cada uno de los parámetros que se evalúan:

7.1. Valores de ponderación

7.1.1. (D) profundidad del nivel freático

Al elaborar el parámetro, se halló que, en el municipio de Subachoque Cundinamarca, no se encontraron valores de profundidades en el rango de 0 a 1.5 metros con una ponderación de 10, es decir, que los valores de profundidad del nivel freático se clasifican de 1 a 9, según la ponderación de la metodología, oscilando entre los 1.5 y > 30,5 metros. Esta zona se puede ver en la figura 5 la cual se identifica de color azul y en mayor detalle en el anexo A.

Dicho lo anterior, hay una sola zona con ponderación 9 correspondiente a profundidades entre los 1,5 y 4,6 metros, el pozo Las Manas, se encuentra en la parte suroriental del municipio en donde se realizan actividades de irrigación y su condición es seco; en el municipio de Subachoque la principal actividad son los cultivos de flores, los cuales se encuentran en las veredas Santuario y la Cuesta, [25]. Según un estudio realizado por el IDEAM, [42] *“en la producción de flores, se usa como criterio de riego aplicar 1 m³ por cama (30 m X 1,3 m), por semana. Cuando se aplica semanalmente (siete días) 1 m³ de agua, se está haciendo una aplicación equivalente aproximada de 143 litros/día-cama”* [42]. Acorde a esta relación, el valor específico aplicable como requerimiento de agua para riego en cultivo de flores bajo condiciones de invernadero es de 36,6 m³ /ha-día, además, mencionan que la demanda hídrica en cultivos de flores permanentes, alcanza un volumen de agua extraída de 73,723,953 m³/año en el departamento de Cundinamarca [42], por lo tanto, es posible que la condición actual del pozo se deba al intensivo uso de agua para la producción de estos cultivos, sin embargo, es importante resaltar que las extracciones ilícitas que se realizan las cuales no son contabilizadas, son un punto importante por el cual el pozo este seco [43].

El pozo Las Manas es una zona de gran interés debido a la baja profundidad del nivel freático aumenta la posibilidad de ser contaminado, puesto que, tendría poco tiempo de contacto entre los contaminantes y el medio no saturado, de esta manera el recurso hídrico tendría un impacto de forma negativa.

Alrededor de la ponderación 9, se encuentran dos pozos que se nombran El Portal y Sintria teniendo como fuente aljibes, ambos pozos tienen condiciones diferentes, mientras que El Portal se encuentra abandonado, el pozo Sintria está en reserva, estos tienen como referencia profundidades de 4.6 Metros (El Portal) y 9.1 metros (Sintria), estos pozos están ubicados en la parte sur del municipio, en la vereda La Cuesta; como se había mencionado anteriormente, la producción de rosas está localizada en estas zonas y según un diagnóstico del municipio el Rosal [44], son 43 empresas ubicadas en el municipio de Subachoque, la cual incrementa el nivel de contaminación y el descenso de los niveles piezométricos.

Por otro lado, se encontró que específicamente en la vereda La Cuesta donde se encuentran los pozos, empresas de gravilla agotaron el recurso de agua de los aljibes, según una noticia realizada en el año 2016 [45], afirma que los campesinos culpan de esta situación a los inmensos cráteres, de 20 y 30 metros de profundidad, que abren las retroexcavadoras y que posteriormente son llenados con agua para ser utilizada en el lavado del material, además, La CAR comprobó, que una de las cinco gravilleras que funcionan en la Cuesta vierte aguas fangosas durante las madrugadas o en los días de fiesta en el río Subachoque.

Y otra está a punto de ser intervenida porque no cumple con los requisitos que exige la ley para ese tipo de actividad, esto incrementa la posibilidad de contaminación y el decrecimiento de los niveles piezométricos para esta zona, cabe resaltar que en el Plan de Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas realizado por la CAR, [30], mencionan que se llevará a cabo un proyecto piloto para conservación de acuíferos y manejo de zonas de recarga en la Zona Crítica en algunas veredas en el departamento Cundinamarca, entre ellas la vereda La Cuesta, por lo tanto, es probable que por tal motivo se encuentre en reserva y/o abandonados. Las zonas con dichas valoraciones se pueden observar en la figura 5 establecidas con el color morado.

En la zona suroccidental y suroriental del municipio se encuentran las ponderaciones 5 y 3, las cuales hacen referencia a uno niveles de profundidad de 9.1- 15.2 y 15.1 - 22.9 respectivamente metros, en esta zona el 40% del uso del suelo es de ganadería como lo reitera el uso del agua en el mapa solicitado en la CAR.

Un estudio revelado por la FAO[46], concluye que aproximadamente una cuarta parte de la superficie de la tierra se utiliza para el pastoreo de ganado, lo cual tiene importantes repercusiones en la cantidad y la calidad del agua disponible, además muchos países están creciendo a gran velocidad la producción ganadera intensiva no controlada que ha provocado ya una importante degradación de la calidad de las aguas subterráneas y superficiales a escala internacional, ya que, el ganado contamina el agua con patógenos que constituyen un riesgo para la salud

humana; la modificación del uso de la tierra y el deterioro de la estructura del suelo influyen de forma considerable FAO, por lo tanto, puede ser una fuente de contaminación, no sólo por las actividades ya mencionadas, si no, por la profundidad a la que se encuentra el acuífero en esta región lo cual disminuye su capacidad de atenuación frente un posible contaminante.

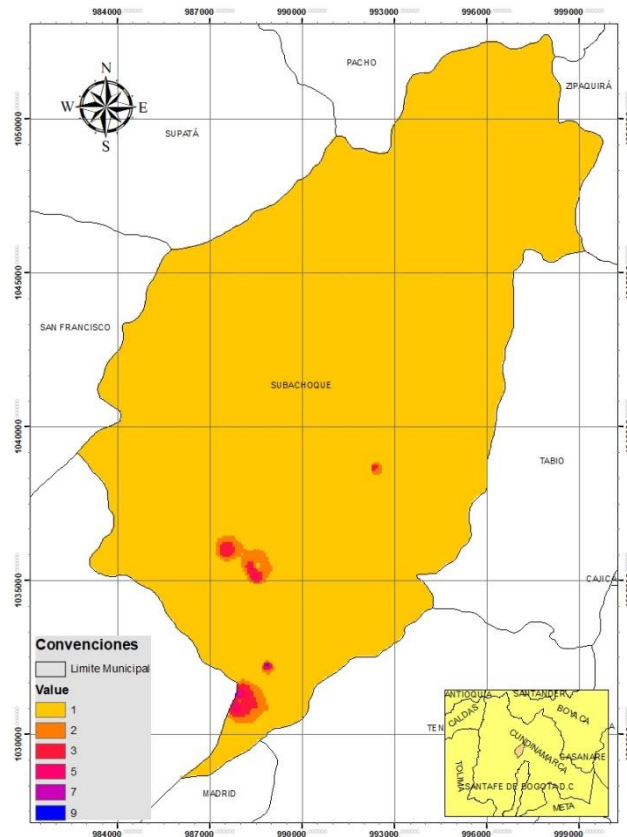
Sin embargo, es importante mencionar que dos de los pozos con ponderaciones 5 y 7, están en condición de reserva, ubicados en la vereda La Cuesta la cual es posible soportar con el proyecto planteado por la CAR (PMA) para la conservación de los acuíferos, algunos de los pozos son abandonados, esto es posible por las extracciones ilícitas.

El pozo cantimplora ubicado en la parte sur en la vereda La Cuesta, en Subachoque Cundinamarca, su uso es activo para la irrigación, tiene una ponderación de 2 con una profundidad de 22.9 - 30.5 metros, lo que significa una baja posibilidad de contaminación o agotamiento, sin embargo, es importante resaltar en el buen uso del recurso hídrico para su conservación.

En la zona norte y centro existen profundidades mayores a 30.5, por lo que se le da una ponderación de 1 según el índice DRASTIC, en su mayoría tienen un uso doméstico pero algunos se encuentran abandonados y/o en reserva, esto contribuye a la capacidad del medio para reducir un impacto negativo sobre el recurso hídrico, sin embargo, en caso de que se presente una posibilidad de contaminación, el incremento longitud vertical representa una protección a contaminación al acuífero y el potencial de disminuir el impacto generado por el contaminante sobre el recurso hídrico subterráneo. Corresponde al color amarillo quemado en la figura 5.

En general los pozos con bajos niveles piezómetros, se dan por las actividades antropogénicas, el consumo excesivo y las diferentes actividades económicas que se llevan a cabo en el municipio. Es importante tener un mejor monitoreo para controlar los pozos con alto rango de contaminación.

Figura 5: Mapa clasificación del parámetro (Dr)



Fuente: Autores

7.1.2. (R) recarga neta

En este parámetro se identificó que en la subcuenca de Subachoque la recarga se produce en las partes más bajas, es decir, que el flujo predominante se da hacia el sur de la cuenca y para el caso del acuífero Guadalupe fluye hacia el centro de la cuenca en dirección sureste[29].

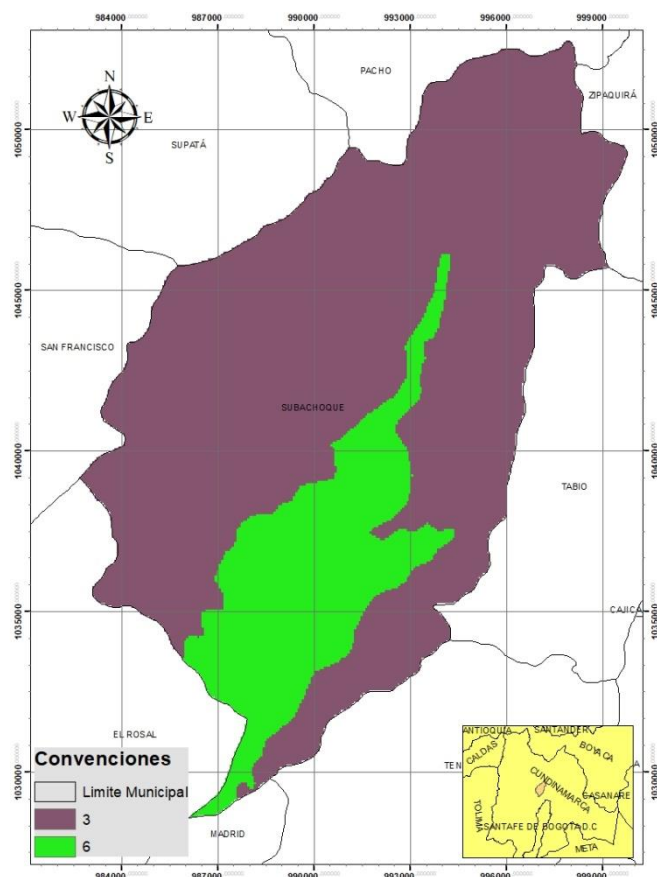
Ahora bien, los valores de recarga para el municipio de Subachoque se dividieron en dos, en la parte alta y baja, tomando como referencia el TIN que se realizó en el mapa de topografía y las unidades de paisaje, donde se encontró que la recarga en la parte montañosa es menor que en la parte planicie que está localizada en la parte sureste, los valores obtenidos son de 95.696 mm/mensual multianual y 120.422 mm/mensual multianual respectivamente, según el balance hídrico realizado bajo la metodología de thornthwaite.

Esta conducta se debe a que en la zona plana predominan las gravas y las areniscas, lo cual cuentan con características de alta permeabilidad generando recarga y volumen de agua de forma descendente hasta llegar a la zona saturada

recargando el acuífero, sin embargo, al mostrar un valor de recarga alto, presentan una mayor vulnerabilidad de contaminación, ya que tiene un mejor desplazamiento vertical llegando al acuífero e impactando de manera negativa.

Por otro lado la zona de menor recarga es una zona más montañosa, donde el 92% de esta zona pertenecen a una secuencia de arenisca, caliza y lutita, como se mencionaba estas no son muy permeables en términos generales, pero su grado de fracturación hace que su almacenamiento de agua subterránea, de igual manera, la diferencia entre la recarga en la zona alta y plana no es muy pronunciada, esto debido a que los suelos y la litología no varían en general del municipio.

Figura 6: Mapa clasificación del parámetro (Rr)



Fuente: Autores

7.1.3. (A) litología del acuífero

Tomando como guía el mapa de litología suministrado por el IGAC, se encontraron las siguientes características litológicas:

Tabla 14: Características litológicas

Litología
1. Depósitos clásticos hidrogénicos. En sectores mantos de ceniza volcánica
2. Rocas clásticas limo arcillosas con depósitos de ceniza volcánica
3. Mantos de ceniza volcánica sobre depósitos clásticos gravigénicos
4. Rocas clásticas arenosas, limo arcillosas y químicas carbonatadas con algunos depósitos de ceniza volcánica
5. Depósitos de ceniza volcánica sobre rocas clásticas limo arcillosas
6. Mantos de ceniza volcánica sobre depósitos clásticos hidrogénicos
7. Depósitos de ceniza volcánica sobre rocas clásticas arenosas, limo arcillosas. En sectores materiales orgánicos
8. Rocas clásticas limo arcillosas y arenosas
9. Rocas clásticas arenosas y limo arcillosas y mantos de ceniza volcánica
10. Rocas clásticas limo arcillosas y arenosas con depósitos de ceniza volcánica

Fuente:[20]

Estas características se encuentran distribuidas en el municipio como se muestra en la figura 7.

Acorde a esto, para clasificar la litología según el índice DRASTIC®, se tuvo en cuenta una consideración, la clasificación es muy general en cuanto a la metodología, es por eso que se limitó la evaluación de arena o grava, lutita masiva, secuencia de arenisca, caliza y lutita, teniendo en cuenta los estudios realizados por INGEOMINAS donde se soporta el tipo de material que se encuentra en el municipio y las características de la litológicas que se observan en la tabla 4.

Dicho esto, en la parte noroccidental del municipio se encontró lutita masiva, como se observa en la figura 8 el área compuesta por roca sedimentaria de grano fino con pequeñas cantidades de agua dadas sus características arcillosas, la lutita es una roca de grano fino compuesta por partículas del tamaño del limo (menos de 1/256 mm) y de la arcilla (entre 1/256 y 1/16 mm)[20].

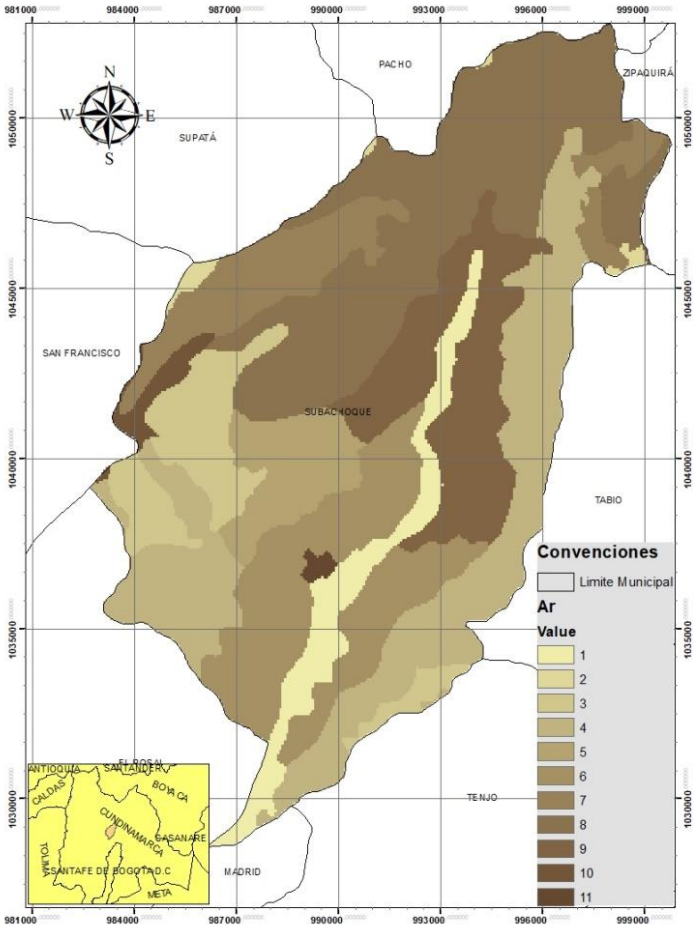
Las lutitas suelen describirse como débiles, porque están poco cementadas, por consiguiente, no bien litificadas ya que los diminutos espacios que la caracterizan no permiten la circulación fácil de las soluciones que contienen el material

cementante, sin embargo, las lutitas son porosas pero poco permeables, porque sus poros son muy pequeños y no están bien comunicados entre ellos[47], *“la incapacidad del agua para penetrar en sus espacios porosos microscópicos explica por qué la lutita forma a menudo barreras al movimiento subsuperficial del agua y el petróleo. De hecho, las capas de roca que contienen agua subterránea suelen estar situadas por encima de los lechos de lutita que bloquean su descenso. En el caso de los depósitos de petróleo ocurre lo contrario. Suelen estar coronados por capas de lutita que evitan con eficacia el escape del petróleo y el gas a la superficie”*[20], esto hace que su ponderación (2) sea baja y por lo tanto reduce la posibilidad de atenuación a contaminación, no obstante, en el estudio de caso solo cuenta con el 1% como se señala en la gráfica 1.

El 92% del área de estudio está representado por secuencia de arenisca, caliza y lutita como se muestra en la gráfica 1. La arenisca son rocas en las que predominan los clastos de tamaño arena libro, tienen una porosidad de 6- 25% y una permeabilidad de 3- 3600 mm/día[48], lo que indica que el grado es relativamente alto de porosidad y permeabilidad lo que las convierte en buenas rocas de yacimiento. Las calizas son rocas por lo general duras y compactas, en estas rocas, pueden formar grandes cavernas que actúan como conductos internos del agua subterránea, las cuales pueden conducir cantidades importantes de agua de un sitio a otro y facilitar la infiltración general. La denudación de las rocas calizas ocasionada por la infiltración del agua de lluvia conforma una topografía kárstica. En una zona kárstica la mayoría de la precipitación pluvial se infiltra a través de fracturas y cavernas[49]. Teniendo en cuenta las características ya descritas, es importante mencionar, que estas zonas presentan gran potencial de almacenamiento de aguas subterráneas por su alto grado de fracturamiento [50], aunque a su vez presenta menor capacidad de atenuación del medio respecto a procesos de contaminación, sin embargo, cuenta con una ponderación de 6 según la metodología DRASTIC.

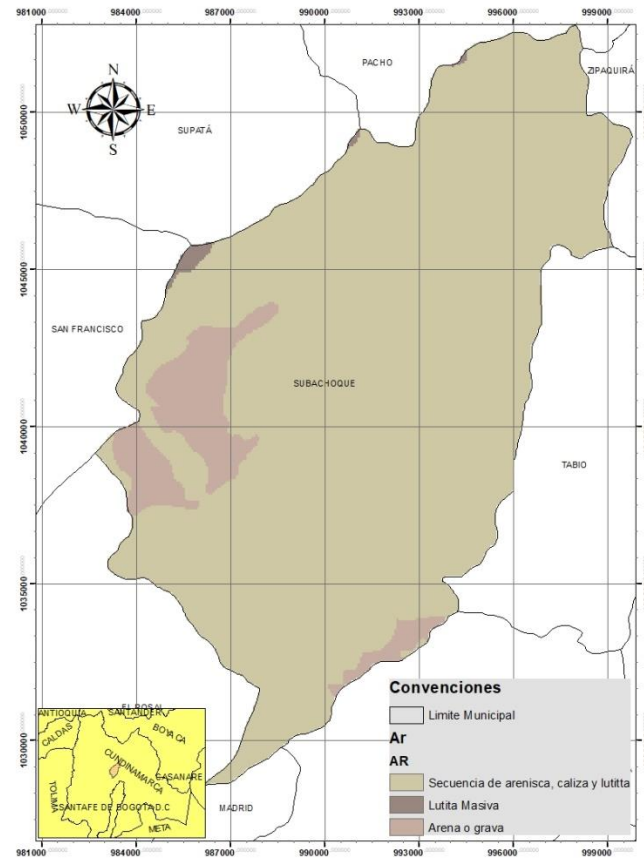
Por último, con una ponderación alusiva a 8, se encuentra, en la parte suroccidente y suroriente del municipio, donde su litología está caracterizada por arenas y gravas, este material, cuenta con espacios porosos, por esta razón, el agua se mueve con relativa facilidad, así pues, proveen muy poca protección al acuífero dadas sus buenas condiciones de drenaje y permeabilidad libro.

Figura 7: Mapa clasificación del parámetro (Ar)



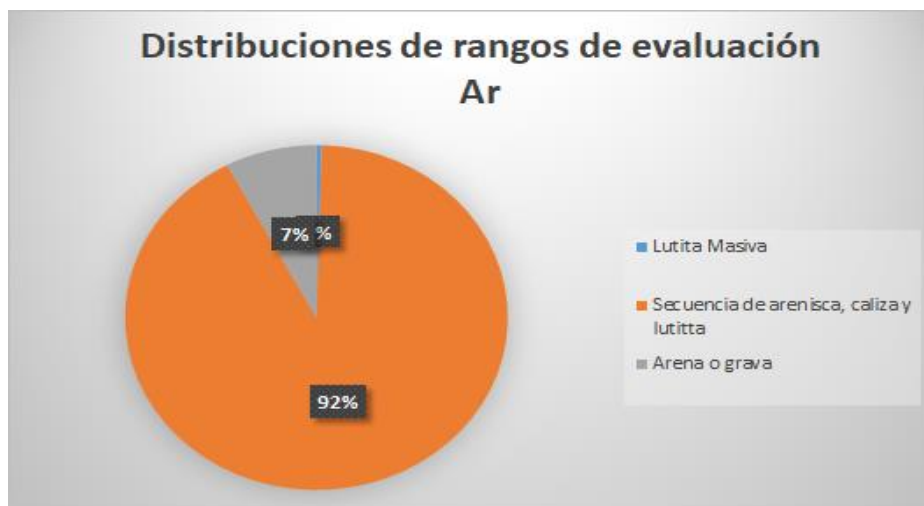
Fuente: Autores

Figura 8: Clasificación de la litología



Fuente: Autores

Grafica 1: Distribución de rangos de evaluación (Ar)



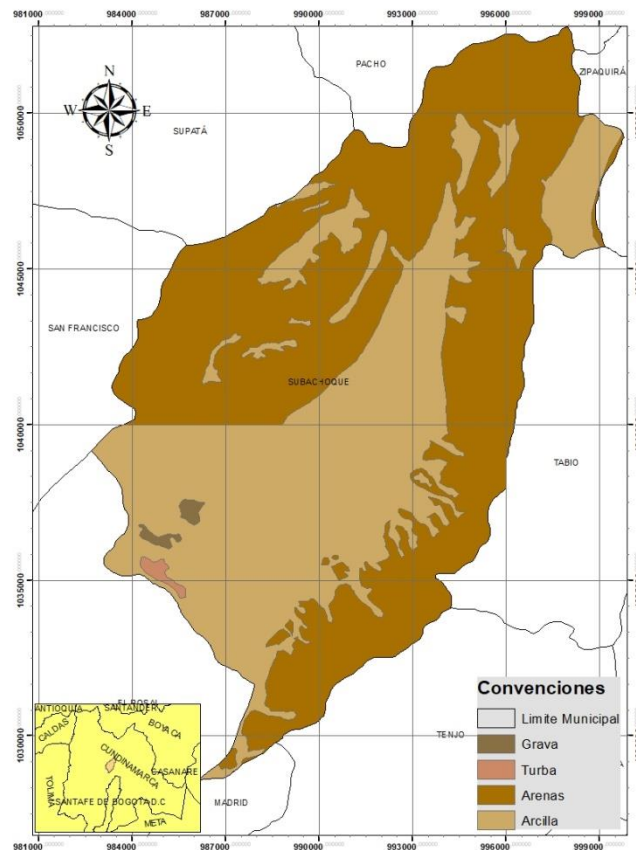
Fuente: Autores

7.1.4. (S) Tipo del suelo

En el municipio de Subachoque se cuenta con tres tipos de suelos característicos los cuales son: arenas, arcillas, gravas y además cuenta con un tipo de material orgánico llamado turba este rico en carbón.

Como se observa en la Figura 9 en el territorio se tiene una mayor presencia de arenas y arcillas, en menor cantidad se encuentra la grava y la turba.

Figura 9: Tipo de suelo en Subachoque



Fuente: Autores

Según la clasificación de suelos definida por la metodología, encontramos que para Subachoque se tiene:

Tabla 15: Clasificación por tipo suelo

Suelo	Valoración
Gravas	10
Arena	10
Turba	7
Arcilla	8

Fuente:[3]

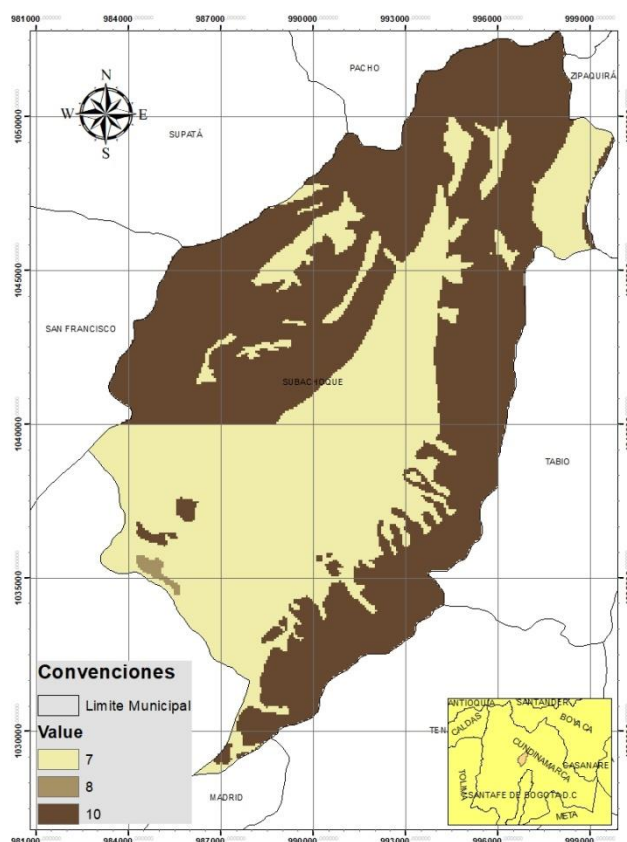
Con ello se identifica que el municipio se encuentra con una clasificación alta vulnerabilidad por el tipo de suelo como se demuestra en la figura 10, esto debido a que las características físicas y químicas de este contribuyen a que se presente una mayor vulnerabilidad en el acuífero.

Las arenas y gravas son materiales porosos y de gran permeabilidad, lo que causa una considerable infiltración del agua y/o sustancia contaminante, este se mueve con una mayor facilidad y con ello proveen poca protección al acuífero[20].

Las arcillas aunque son materiales más porosos que las arenas y las gravas, estas se caracterizan por tener poca permeabilidad, por ello retardan la entrada del agua y reteniendo humedad después de los periodos de lluvia[20],[13].

Mientras que las turbas al ser un material orgánico y por su composición de fibras vegetales presenta características de semipermeabilidad[51].

Figura 10: Mapa clasificación del parámetro (Sr)



Fuente: Autores

7.1.5. (T) Topografía

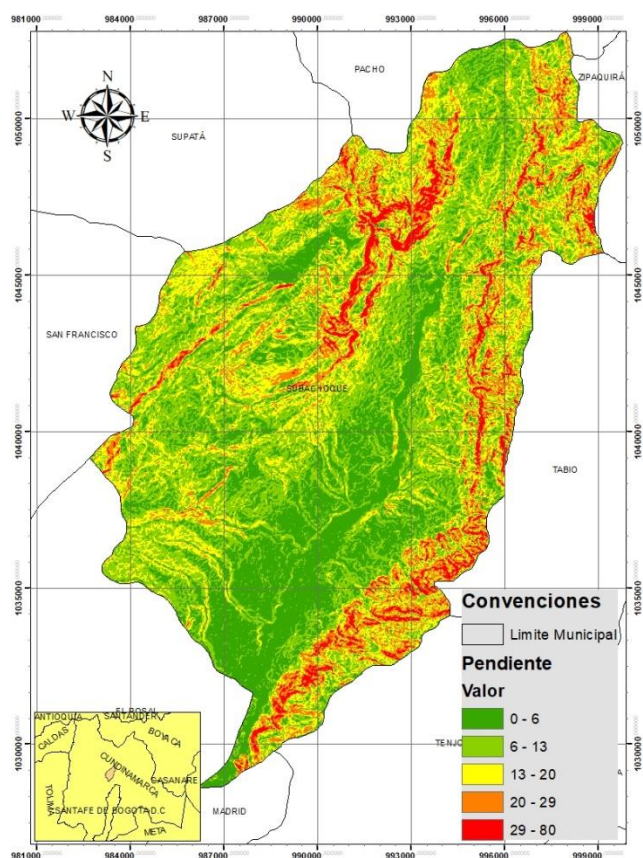
Subachoque se caracteriza por tener pendientes con gradiente inclinados, fuertemente inclinado, escarpado, muy escarpado ya que se encuentran pendientes mayores al 75%.

En el municipio se pueden identificar dos divisiones en su relieve las cuales son:

- **Altiplano:** esta zona se caracteriza por tener una altura promedio de 2500 m.s.n.m. El altiplano se ubica limitado entre cordones montañosos y se pueden encontrar planicies lacustres y terrazas altas, ubicada al oriente de municipio que corresponde al noreste de la sabana de Bogotá.
- **Zona Montañosa:** para esta zona se presentan alturas entre los 2600 y 3600 m.s.n.m. en la figura 10 podemos observar que las mayores alturas se dan al norte y en los límites oriental y occidental del municipio. La zona montañosa tiene predominancia en geoformas de origen fluvio glacial, fluvial y montañas con formas redondeadas, entre estas se destacan: Cerro

o Cuchilla El Tablazo, Cerro La Soldadesca o El Carare, Cerró El Juaica, Cerro Carrasposo y Pedregoso[25].

Figura 11: Mapa de pendiente del municipio Subachoque



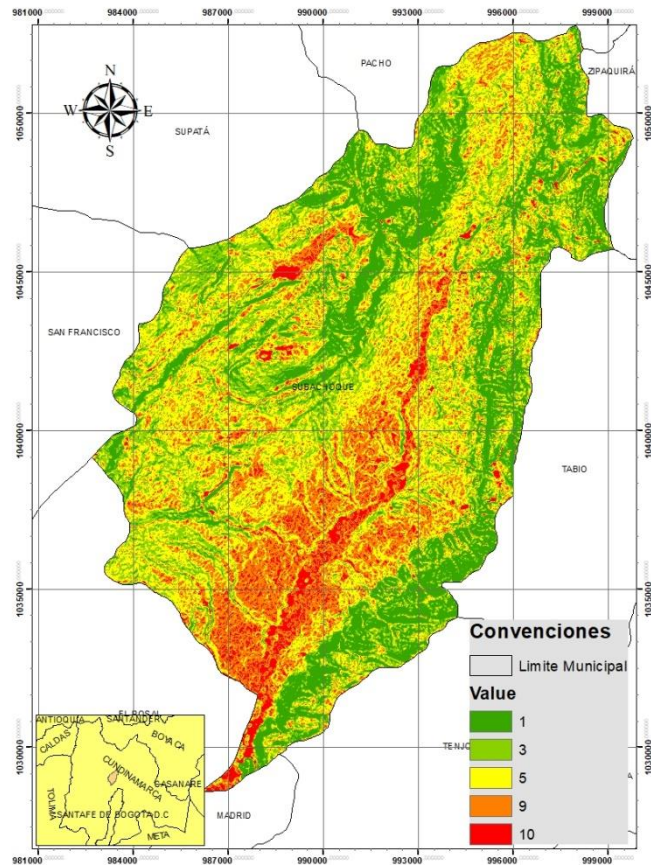
Fuente: Autores

Es importante tener en cuenta que la topografía juega un papel importante en la evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos, esto debido a que las variaciones pueden facilitar la evacuación de los contaminantes a través de la escorrentía superficial y subsuperficial[12].

A partir de estas características topográficas presentes en el municipio y aplicando la metodología, se encontró que en promedio el municipio tiene una valoración para zonas planas de 5 a 10 y para las zonas donde hay presencia de montaña tiene una valoración promedio de 1 a 3 como se observa en la figura 12. Esto se debe a que hay menor vulnerabilidad del acuífero en las zonas montañosas ya que se presenta escorrentía de la sustancia contaminante y este tiene menos posibilidad de encontrar la zona saturada debido a las capas que están sobre esta zona protegen el acuífero. Mientras en las zonas planas es todo lo contrario

puesto que el comportamiento de la topografía facilita que el flujo contaminante sea estacionario lo que tiene como consecuencia que esta sustancia pueda infiltrarse.

Figura 12: Mapa clasificación del parámetro (Tr)



Fuente: Autores

7.1.6. (I) Impacto en la zona no Vadosa

Tomando como guía el mapa de unidades cronoestratigrafías desarrollado por datos abiertos gobierno digital Colombia en el año 2015, se encontraron las siguientes características para el área de estudio:

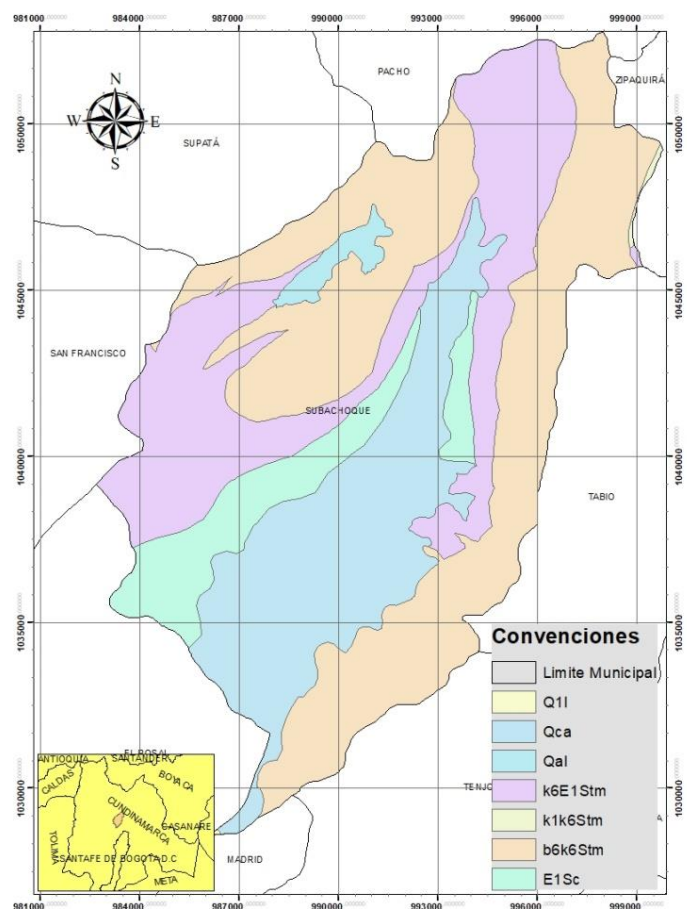
Tabla 16: Unidades cronoestratigráficas Subachoque

Unidad cronoestratigráfica	Característica
Qca	Abanicos aluviales y depósitos coluviales, bloques de grava, algunos dentro de matriz franco arcillosa. En los depósitos aluviales predomina arenas, limos y gravas
Qal	Depósitos aluviales y de llanuras aluviales
Q1l	Arcillas, turbas, y arcillas arenosas con niveles delgados de gravas. Localmente, capas de depósitos de diatomeas.
K6E1	Arcillolitas rojizas con intercalaciones de cuarzoarenitas de grano fino. Mantos de carbón a la base.
K1K6	Shales, calizas, fosforitas, cherts y cuarzoarenitas.
E1	Conglomerados intercalados con arenitas de grano medio a grueso y lodolitas carbonosas
B6K6	Shales, calizas, arenitas, cherts y fosforitas

La estratigrafía del municipio se encuentra distribuida de la siguiente manera: en el sur de Subachoque en una pequeña porción, se encuentra la unidad cronoestratigráfica Q1l la cual tiene como características arcillas, turbas y arcillas arenosas con niveles delgados de gravas. Localmente, capas de depósitos de diatomeas; en la zona noroeste están las características alusivas a depósitos aluviales y de llanuras aluviales por lo que se encuentra la unidad Qal; la unidad K6E1 que tiene gran cobertura en el municipio se encuentra en la parte norte y noroeste, la cual está descrita en la tabla 17; en todo el centro de la zona de estudio se encuentra la unidad Qca en donde hay abanicos aluviales y depósitos coluviales, bloques de grava, algunos dentro de matriz franco arcillosa. En los depósitos aluviales predomina arenas, limos y gravas; por la misma ladera más hacia la parte suroeste se encuentran conglomerados intercalados con arenitas de grano medio a grueso y lodolitas carbonosas debido a la unidad E1; como gran unidad predominante está B6K6 el cual está ubicado en la parte sur, noreste y noroeste como se puede observar en la figura 13 correspondiente a shales, calizas, arenitas, cherts y fosforitas, por último en una mínima proporción está la unidad K1K6 la cual tiene como particularidad shales, calizas, fosforitas, cherts y cuarzoarenitas.

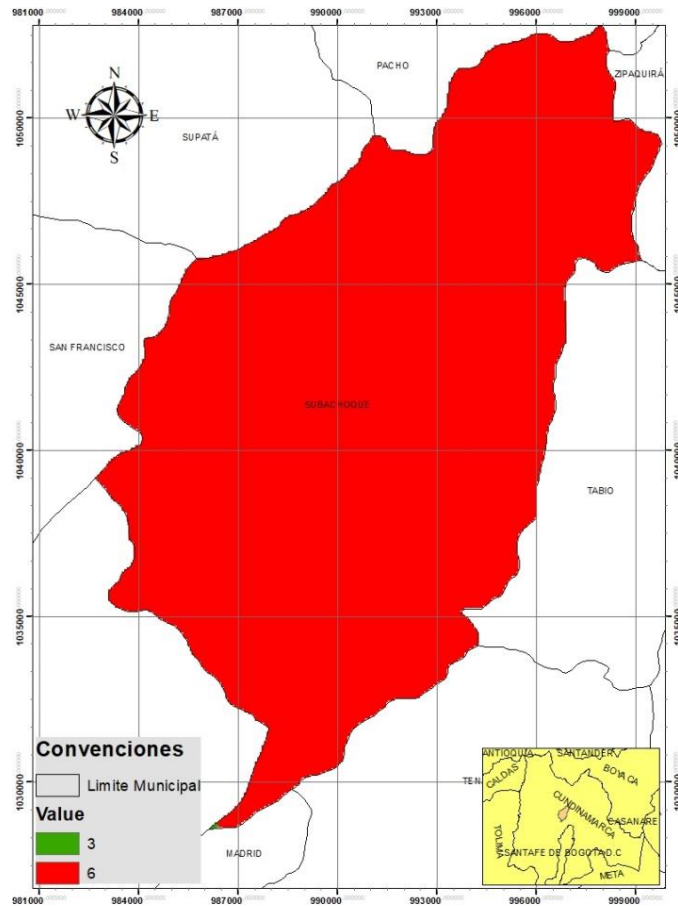
Estas unidades pueden evidenciarse en la figura a continuación o en el anexo I con mejor detalle.

Figura 13: Mapa unidades cronoestratigrafías Subachoque



Fuente: Autores

Figura 14: Clasificación del parámetro Ir



Fuente: Autores

Dicho lo anterior, las características ya descritas fueron clasificadas según la metodología, por lo que a nivel general se obtuvieron cuatro atributos referentes a la zona no vadosa, donde en la parte correspondiente a la unidad Qca tiene características de cieno- arcilla, es decir, que el área está compuesta por granos muy pequeños con un tamaño de 0.0002 a 0.05 mm, y sólo se pueden ver a través del microscopio, con referencia a los suelos arcillosos el agua pasa lentamente por lo tanto pertenecen a una zona saturada [52], el cieno es un material generalmente negro, finamente granuloso, que se encuentra en los pantanos y consistente en limos finos mezclados con materias carbonosas provenientes de vegetales descompuestos[53], lo que lo hacen suelos semipermeables[51].

Por otro lado, la zona evaluada se divide en dos respecto al tipo de perfiles de la unidad, los cuales son: AC-19; CT-2b; AC-7, lo que indica que los suelos son

profundos a superficiales, bien a pobremente drenados, de texturas finas a medias y baja a moderada evolución[54], y en la otra parte de la primera característica arcilla-cieno, se encuentran los perfiles AC-8; CT-4a; AC-18; CT-14a, lo que significa que son suelos profundos a moderadamente profundos, bien a imperfectamente drenados, de texturas finas a moderadamente gruesas[54], dicho esto, las características de este medio nos indica que presenta menor capacidad de atenuación de contaminación por su tamaño de grano.

En la parte suroriental con una ponderación de 6 se encuentra arena o grava contenido de cieno y arcilla significativa, contamos con dos grupos de perfiles que nos indican las características de estos suelos, el primer grupo cuenta con estos perfiles: MU-9; N-16; CC-306 que son rocas clásticas arenosas y depósitos orgánicos, son bien drenados, de texturas moderadamente finas a gruesas, profundos a superficiales, limitados por contacto lítico y nivel freático alto, como segundo grupo se tiene CC-226; CC-228; CU-75; CU-123, los suelos de esta unidad han evolucionado a partir de rocas clásticas limo arcillosas y arenosas, y, son bien a excesivamente drenados, profundos a superficiales limitados por contacto con material rocoso coherente y de grupo textural fino a moderadamente grueso, finalmente, lo que indica que cuenta con gran capacidad de infiltración y por ende un riesgo mayor a contaminar el recurso hídrico subterráneo[54].

Ocupando una gran parte del área, se tiene una secuencia de arenisca, caliza y lutita, según los perfiles que se encuentran en esta zona los suelos son bien a excesivamente drenados con partículas de tamaño de fino a grueso, lo que coincide con las características de esa secuencia, la cual cuenta con gran permeabilidad y sobre todo fracturación por lo que la susceptibilidad a ser contaminado aumenta de manera significativa, esta zona cuenta con una ponderación de 6.

Por último con el mismo grado de ponderación se encuentran las areniscas que tienen una particularidad especial, contienen espacios intersticiales entre sus granos, con alta permeabilidad, lo que significa que el grado de vulnerabilidad de igual es alto.

7.1.7. (C) Conductividad hidráulica “K”

A partir de la información obtenida se observó que el acuífero cuaternario-Subachoque cuenta con una conductividad hidráulica que oscila entre los 0.08 a 4.8 en unidades de metros/día[55] como se puede observar en la figura 15. Con lo cual se pudo determinar que según la metodología estos valores de conductividad aunque tienen un pequeño riesgo solo presentan valores de clasificación bajos como se puede observar en la figura 16.

Si bien se tienen valores de conductividad bajos y teniendo presente que este parámetro es la capacidad del suelo de permitir transmitir una sustancia, con ello

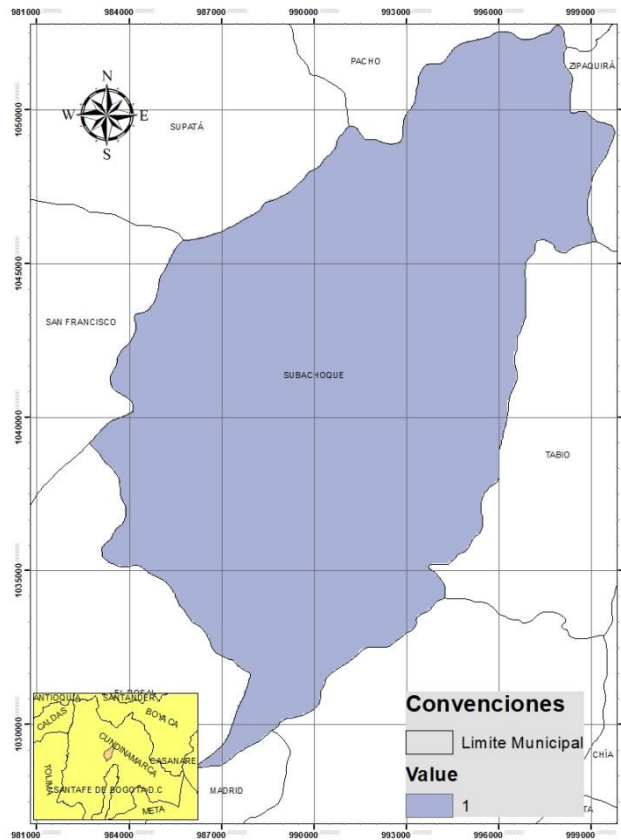
se tiene que para una sustancia contaminante no será de facilidad moverse dentro de este sistema y con esto no será fácil su introducción en el acuífero[16].

Figura 15: Conductividad hidráulica del municipio Subachoque.



Fuente: Autores

Figura 16: Clasificación parámetro (Cr)



Fuente: Autores

7.2. Índice de vulnerabilidad DRASTIC

Aplicando la metodología, por medio del software y con la herramienta álgebra de mapas y superposición (Weighted Sum), se obtuvo el índice de vulnerabilidad, se utilizaron estas dos herramientas con el fin de observar las diferencias en el resultado, sin embargo, se perciben los mismos rangos de vulnerabilidad, esto, para verificar que el resultado fuera correcto.

En visto de ello, realizados los mapas de cada una de las variables consideradas por el modelo, se establece el índice de vulnerabilidad intrínseca del sistema acuífero en el municipio de Subachoque, indicando valores de 80 a 153, es decir, de bajo a alto, respectivamente.

Se estima en primera instancia que en la parte montañosa noreste de la zona de estudio, identificado con color verde oscuro, tiene un grado de vulnerabilidad bajo, oscilando entre 80 a 91, como se observa en la figura 17, esto se debe al tipo de suelo, ya que se tiene en esta zona arcillas, las cuales cuentan con un grado de

permeabilidad baja y de igual manera se tiene una recarga neta que fluctúa de 50 - 103 mm/mensual multianual, indicando que el suelo no retiene agua en grandes volúmenes, además, las pendientes son pronunciadas lo que favorece la escorrentía hacia las planicies.

En la zona noroeste de Subachoque se analiza una baja vulnerabilidad, donde se tiene lutita masiva, correspondiente a la litología, implicando rocas clásticas limo arcillosas, lo que conlleva a un suelo poroso pero poco permeable, obstruyendo el paso del contaminante, por otro lado, un parámetro influyente, es la topografía, debido a que es la parte más alta marcando un territorio montañoso.

Finalmente cerrando este rango, en la parte central del municipio, se encuentra la zona no vadosa, el cual, es el factor determinante para que se presente una baja vulnerabilidad, pese a que hay presencia de cieno-arcilla, lo significa que el suelo es poco permeable y restringe el paso del contaminante.

Para la siguiente zona evaluada se tienen rangos de 91 a 97, sin embargo, se sigue presentando un grado de vulnerabilidad baja, como se puede ver en la tabla 9, puesto que se sigue presentando pendientes pronunciadas con unidades de paisaje montañoso, por otro lado y en consecuencia de los resultados de recarga neta y profundidad se tienen calificaciones bajas y por ello una menor atenuación del contaminante.

En el sentido oeste identificado con color amarillo y una fluctuación de 97 a 103, donde aún se sigue considerando una vulnerabilidad baja con respecto a la metodología DRASTIC®, sin embargo, cabe resaltar que tiene pequeñas zonas donde se presenta una vulnerabilidad moderada a causa de las características de tipo de suelo y litología, dado que hay arenas y gravas respectivamente, estos materiales se resaltan por tener una gran capacidad de permeabilidad y porosidad, así mismo la topografía tiene una influencia significativa por lo que cuenta con una pendiente no tan marcada, por ende, hay mayor riesgo de que el contaminante se infiltre y afecte el recurso hídrico.

El sureste del territorio, presenta características alusivas a la zona anteriormente mencionada, adicionando, que hay presencia de una secuencia de arenisca, caliza y lutita, lo cual implica que la porosidad y la permeabilidad son relativamente altas, pero estas rocas tienen una particularidad importante y es que la infiltración se da a través de las fracturas, lo que las hace buenos conductos internos del agua subterránea, las cuales pueden conducir cantidades importantes de agua de un sitio a otro y facilitar la infiltración, por ende este factor hace que la vulnerabilidad en este punto específico aumente.

El riesgo moderado se ubica en el centro del municipio, con un rango de 103 a 110, reconocido con el color naranja, puesto que, presenta una recarga moderada ya que está en un intervalo de 103 a 178 mm, este parámetro va muy ligado a la

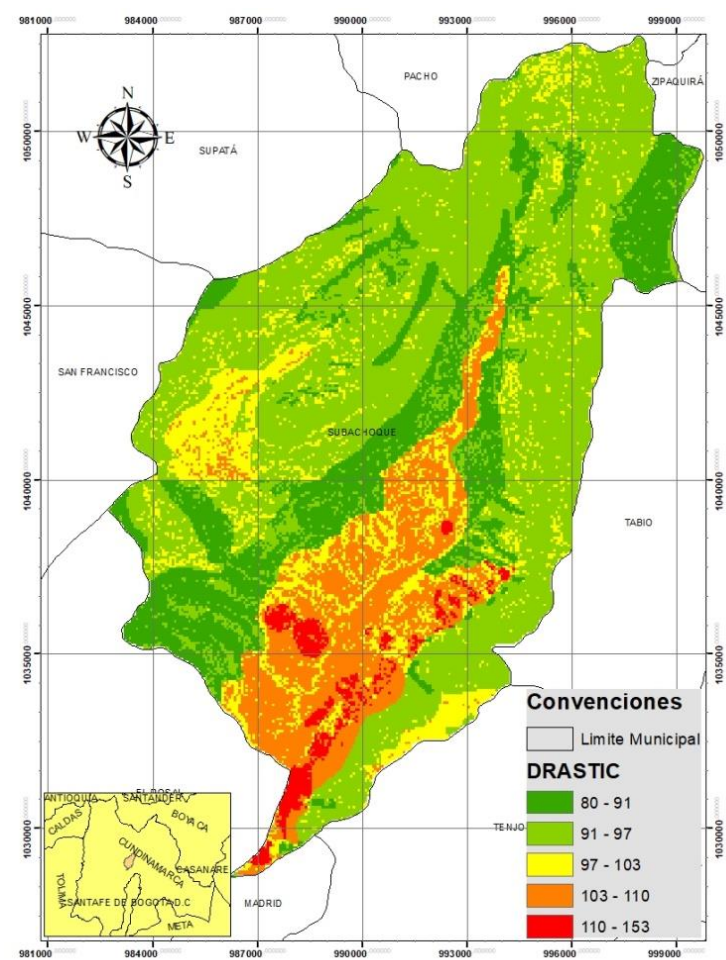
litología , ya que en esta zona plana predominan las gravas y las areniscas, como ya se había mencionado, cuenta con características de alta permeabilidad originando una mayor recarga y volumen de agua de forma descendente con un mayor desplazamiento hasta llegar a la zona saturada recargando el acuífero.

Teniendo como alto grado de vulnerabilidad con un intervalo de 110 a 153, identificado con el color rojo, el parámetro con más incidencia en esta área es la profundidad, ya que justo en los puntos rojos el nivel piezométrico de los pozos es muy bajo, esto conlleva a que el tiempo de contacto entre los contaminantes y el medio no saturado, sea en menor, por lo que la recarga neta tiene un papel importante, por esta razón el desplazamiento de la cantidad de agua es significativa y de manera vertical, sin embargo, no menos importante la litología influye de gran manera, dado que, en esta zona se encuentran una secuencia de areniscas, calizas y lutitas, lo que genera una mejor movilidad del contaminante y de esta manera el recurso hídrico tendría un impacto de forma negativa.

El parámetro de conductividad no fue muy relevante a la hora de analizar las zonas vulnerables, por lo que el valor oscila entre los 0.08 a 6.5 m/día, de esta manera implica que no hay una mayor incidencia con respecto a la contaminación del acuífero.

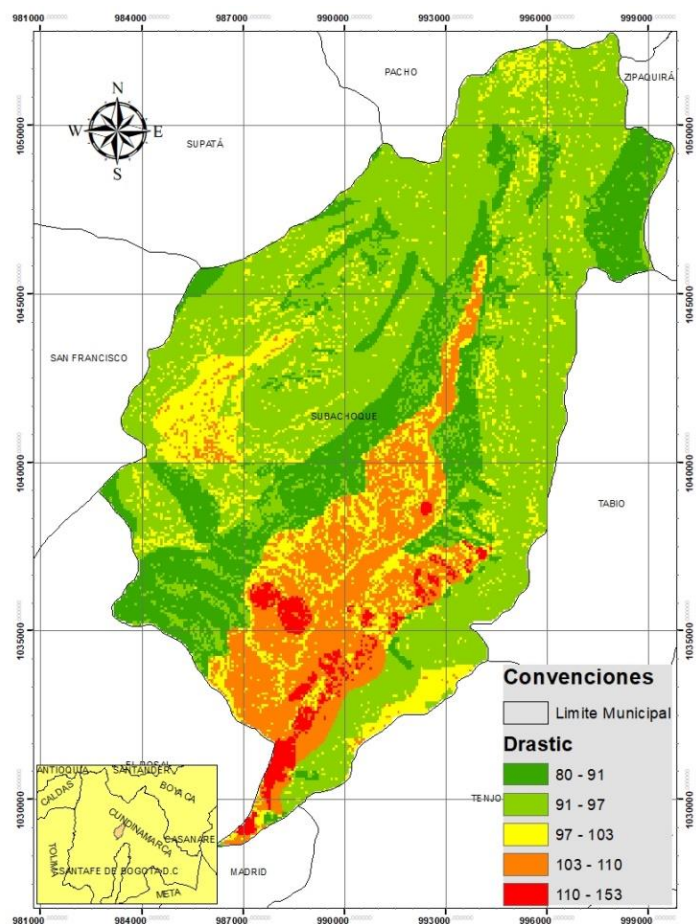
Por último, se encontró que para las zonas donde se presenta una alta vulnerabilidad, tenemos presencia de asentamiento de poblaciones, mayor concurrencia del paso de vehículos por la cantidad de vías que se registran en estas zonas. Lo que tiene como consecuencia una mayor afectación debido a las diferentes diarias que se pueden presentar en estos lugares y sus posibles actividades que generan vertimientos, las cuales por infiltración y demás factores descritos anteriormente pueden llegar al acuífero y por ello se de una afectación y/o contaminación al mismo.

Figura 17: DRASTIC - herramienta algebra de mapas



Fuente: Autores

Figura 18: DRASTIC - herramienta Weighted Sum



Fuente: Autores

Conclusiones

La evaluación de la unidad hidrogeológica fue determinada a partir de la recolección de información suministrada por las entidades públicas, por ende, al realizar la implementación de la metodología DRASTIC® y haciendo uso del software ArcGis 10,2,2, se logró definir los diferentes rangos de vulnerabilidad en el territorio, donde no se encontró calificación de alta vulnerabilidad y con ello se pudo concluir que para las diferentes variables, se presenta una relación entre las características del suelo y la pendiente, dado que en las zonas donde la pendiente es mayor hay presencia de materiales los cuales se caracterizan por ser materiales porosos y de mayor permeabilidad como las arenas; se genera una baja vulnerabilidad debido a que en la topografía se presenta escorrentía y con ello el contaminante tomara dirección a las zonas de planicie.

En el anexo J el valor de conductividad es uniforme en toda el área de estudio, lo que influye en la velocidad con la que el contaminante se desplazaría por el acuífero, sin embargo, cabe resaltar que incide significativamente que el valor de este parámetro fue tomado de un estudio realizado, dado que no se pudo desarrollar una prueba de campo por factores de tiempo y costos.

El nivel de agua en los pozos obtenidos permite identificar las zonas donde se evidencia la sobre-explotación del recurso hídrico subterráneo cerca de la zona urbana al presentar bajos niveles piezómetros, incrementando la vulnerabilidad con relación de años anteriores, concluyendo el aumento de contaminación no sólo en cantidad si no en calidad del recurso subterráneo.

En la variable de topografía se hallaron grandes diferencias en las parte altas y bajas del municipio, lo que genera aumento en la recarga del acuífero, a causa del fracturamiento de las areniscas que de igual manera contribuye la recarga y por ende el índice de vulnerabilidad en estas zonas planicies.

El área de estudio cuenta con un acuífero semi-confinado, por ello la unidad hidrogeológica está constituida por el grupo Guadalupe en donde, aflora la formación Arenisca Dura, en el cual la litología está constituida por areniscas, lutita, limotitas, arcillolitas, a su vez, el tipo de suelo se distribuye en arcilla, turba, arenas y pocas gravas.

Las entidades ambientales han mejorado los estudios en cuando a calidad y cantidad, esto permite que se genere más estudios de evaluación de unidades hidrogeológicas, o modelos del recurso subterráneo, como lo es el índice DRASTIC.

El método trabajado sirve de aplicación para la evaluación de vulnerabilidad de manera acertada, sin embargo, cuenta con un limitante, se debe tener

disponibilidad de las variables a medir, por ende, su aplicación va de manera más enfocada en el desarrollo investigativo.

Es posible aplicar el modelo a nivel nacional, sin embargo, es importante destacar que un gran porcentaje de Colombia no cuenta con la información de manera completa para la aplicación del índice DRASTIC®, por lo que los estudios en el país se realizan bajo la metodología GOD, que demanda menos parámetros para la evaluación de vulnerabilidad.

El mapa resultante de la superposición de los siete parámetros para hallar la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del sistema de acuíferos en el municipio de Subachoque desarrollado bajo el modelo DRASTIC®, reconoce que el 85 % del municipio tiene un rango bajo de vulnerabilidad, seguido de un 14% con índice moderado, y finalmente un 1% bajo, por lo que se requiere mantener un plan de manejo adecuado, buscando la prevención y cuidado del recurso hídrico, asimismo se define que el factor geológico y litológico son las principales circunstancias del factor de vulnerabilidad.

La valoración de los parámetros enviúdales del modelo DRASTIC® demostró la importancia de cada uno de estos en la ponderación, percatando la interacción de las variables que se genera en el mapa grafico final, así mismo, manifiesta la practicidad del desarrollo de este modelo mediante las herramientas SIG, lo cual hace más fácil el análisis e interpretación de las áreas de interés, del mismo modo, los parámetros más influyentes en el resultado, estableciendo medidas para la mitigación y cuidado.

Se establece que la metodología DRASTIC®, sólo es uno de tantos métodos aplicables para la evaluación de vulnerabilidad, por el cual se logró determinar las áreas vulnerables a contaminarse, dando resultados congruentes con la información encontrada, así mismo sus valores individuales de ponderación son adecuados según los soportes teóricos y la dinámica general de los acuíferos, corroborando que la metodología empleada, es confiable para las áreas de investigación.

Recomendaciones

Para la importancia que presenta el recurso hídrico en nuestro país, no solo para las diferentes actividades diarias que se desarrollan para la economía como lo son las industrias, agricultura y demás, este “liquido”, es vital para la vida y las diferentes cadenas biológicas que encontramos en los ecosistemas. Aunque se han desarrollado diferentes estudios de recurso hídrico subterráneo y superficial en todo el país, aun se sigue presentando los distintos problemas como la falta de información, ya que aunque se cuente con las diferentes estructuras y sistemas para la medición de variables climatológicas e hidrológicas muchas de estas no funcionan, además la poca facilidad que dan las diferentes entidades para entregar este tipo de información ya sea por establecer extensos rangos de tiempo para entregarla o los costos elevados en algunas ocasiones. Por ello se recomienda en primera instancia poner en funcionamiento las diferentes herramientas para brindar la información y como segunda medida es que los datos que tienen las entidades ambientales las entreguen en tiempos más cortos y a costos más asequibles.

Se le recomienda al municipio de Subachoque incentivar la elaboración de más estudios relacionados al recurso hídrico subterráneo ya que la información que se encuentra en libros, sitios web y los diferentes proyectos realizados al entorno de esta temática, presenta información más generalizada sobre la sabana de Bogotá. Además de un mejor monitoreo del territorio para tener un mayor control de las actividades ilícitas que toman agua de los acuíferos en grandes volúmenes.

Se aconseja para la corporación autónoma regional de Cundinamarca planear y posteriormente llevar en acción estrategias para la protección de las zonas que presentaron una alta vulnerabilidad, esto con el fin de prevenir la contaminación del recurso hídrico y tener una mayor protección del acuífero presente en el municipio.

Las aguas subterráneas del municipio son de gran importancia de varios factores, se recomienda a la CAR, realizar un monitoreo de manera más minuciosa ya que Se desconocen los valores de profundidad en aquellos pozos que no cuentan con concesiones por lo que se deben analizar todos los pozos e identificar los pozos de extracción ilegal para que sean cerrados y se evalúe el impacto generado sobre todos los recursos naturales.

Bibliografía

- [1] MADS, “Decreto 1640 de 2012,” *Minambiente.gov.co*, vol. 2012, no. Agosto 2, pp. 1–28, 2012.
- [2] P. Martinez and Silvino Castaño, “1. Fundamentos_de_Hidrogeologia (1).pdf.” p. 284, 2006.
- [3] L. Aller, T. Bennett, J. H. Lehr, R. J. Petty, and G. Hackett, “DRASTIC : A Standardized Method for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings,” *NWWA/Epa-600/2-87-035*, p. 455, 1987.
- [4] MINAMBIENTE, “Gestión Integral del Recurso Hídrico | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.” [Online]. Available: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico>. [Accessed: 14-Jul-2018].
- [5] ESRI, “Modelos digitales de elevación—Conceptos relacionados | ArcGIS.” [Online]. Available: <https://learn.arcgis.com/es/related-concepts/digital-elevation-models.htm>. [Accessed: 14-Jul-2018].
- [6] IDEAM, “MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA - IDEAM.” [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrogeologica>. [Accessed: 14-Jul-2018].
- [7] J. ALONSO, “PROPIEDADES FÍSICAS : DENSIDAD Y POROSIDAD,” no. June 2013, 2014.
- [8] V. Maria, O. Carolina, and V. Maria, “Aguas subterraneeas enfoque practico.” p. 111.
- [9] H. Perea and Y. Yaretzi, “¿Que son los sistemas geograficos , aplicaciones en la Agricultura y Ganadería ?”
- [10] SINA, “Informe del estado del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables 2012 , 2013 y 2014.,” p. 362, 2015.
- [11] M. Victoria and V. Otálvaro, “Hidráulica de aguas subterráneas,” 1999.
- [12] MAVDT, “PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD INTRINSECA DE LOS ACUÍFEROS A LA CONTAMINACIÓN,” no. 1021, 2010.
- [13] M. J. Albinet M, “Cartographie de la vulnerabilite a la pollution des nappes d’eau sout erraine,” *Bulet BRGM 2nd Ser.*, vol. 3, no. 4, pp. 13–22, 1970.
- [14] L. Aller, J. H. Lehr, and R. Petty, “A Standardized System to Evaluate Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings,” *National Water Well Association*. p. 20, 1987.
- [15] B. M. E. and W. L. Myers, “A GIS-based approach to evaluating regional groundwater pollution potential with DRASTIC,” *J. Soil Water Conserv.*, no. March 1990, 1990.
- [16] H. Baalousha, “Assessment of a groundwater quality monitoring network using vulnerability mapping and geostatistics: A case study from Heretaunga Plains, New Zealand,” *Agric. Water Manag.*, vol. 97, no. 2, pp. 240–246, 2010.
- [17] Secretaria Distrital de Ambiente, “Aguas subterráneas.” [Online]. Available: <http://ambientebogota.gov.co/aguas-subterraneeas>. [Accessed: 14-Jul-2018].

- [18] I. G. y M. de España, "Evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación por plaguicidas," 2009.
- [19] HYDROGEOLOGICAL CONSULTING SERVICES IN SOUTH AFRICA, "DIRECTORATE WATER RESOURCE PLANNING SYSTEMS," no. 3.
- [20] E. J. Tarbuck, F. K. Lutgens, D. Tasa, AMR traducciones científicas, T. E. J, and F. K. Lutgens, *Ciencias de la tierra una introducción a la geología física*. 2005.
- [21] Aguamarket, "Capa confinante." [Online]. Available: <http://www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?Id=4714>. [Accessed: 14-Jul-2018].
- [22] S. Angelone, M. T. Garibay, and M. Cauhapé C., "Geología y Geotecnia - Permeabilidad de suelos," *Univ. Nac. Rosario*, p. 39, 2006.
- [23] Sanders, "A manual of field Hydrogeology.," no. 1998, pp. 9–10, 1998.
- [24] Alcaldía Municipal de Subachoque en Cundinamarca, "Aprende sobre nuestra historia y territorio." [Online]. Available: <http://www.subachoque-cundinamarca.gov.co/tema/municipio>. [Accessed: 14-Jul-2018].
- [25] A. Rojas and D. Garcia, *ANÁLISIS DE CAMBIOS DE USOS Y COBERTURAS DEL SUELO EN LOS MUNICIPIOS EL ROSAL Y SUBACHOQUE*. 2016.
- [26] A. Lobo-Guerrero, "Geología e Hidrogeología de Santafé de Bogotá y su Sabana," *VII Jornadas Geotec. la Ing. Colomb.*, pp. 1–20, 1992.
- [27] INGEOMINAS, "Geología de la sabana de bogotá," 2005.
- [28] J. Amarillo and C. Bloise, "EVALUACIÓN DE LOS RIESGOS DE CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS PERTENECIENTES AL MUNICIPIO DE MADRID."
- [29] IDEAM, *Aguas Subterráneas en Colombia Una Visión General*. 2013.
- [30] CAR, *Plan de Manejo Ambiental de agua subterránea en la sabana de Bogotá y Zona Crítica*. 2008.
- [31] Consejo Municipal de Uribe, "Plan de Desarrollo Municipal 2012-2015.," no. 3, 2012.
- [32] Presidencia de la República de Colombia, "Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente," p. Diario Oficial No. 34243, 1974.
- [33] ministerio de agricultura, "Preservacion De Las Aguas," *Julio 26*, vol. 1978, no. Julio 26, p. 48, 1978.
- [34] Congreso de Colombia, "Ley 9 de 1979." [Online]. Available: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=1177>. [Accessed: 14-Jul-2018].
- [35] Ministerio del Medio Ambiente, "Ley 99 De 1993," *D. Of.*, no. 41146, p. 44, 1993.
- [36] C. De Colombia, "Ley 373 DE 1997," *Meta*, vol. 4, no. January, p. 61, 2005.
- [37] Republica de Colombia, "Decreto 1729 de 2002." [Online]. Available: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=5534>. [Accessed: 14-Jul-2018].
- [38] Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial, "Decreto 1323 de

- 2007,” 1993.
- [39] Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial, “Decreto 4728 de 2010,” *D. Of. 47873 diciembre*, p. 3, 2010.
 - [40] IGAC, “Aspectos prácticos de la adopción de marco geocéntrico nacional de referencia Magna-Sirgas como datum oficial de Colombia,” p. 97, 2004.
 - [41] “MAGNA-SIRGAS / Colombia Bogota zone.” [Online]. Available: http://georepository.com/crs_3116/MAGNA-SIRGAS-Colombia-Bogota-zone.html. [Accessed: 31-Jul-2018].
 - [42] M. Gonzalez, G. Sladarriga, and O. Jaramillo, “Estimación de la demanda del agua: Conceptualización y dimensionamiento de la demanda hídrica sectorial,” *Estud. Nac. del Agua*, pp. 169–228, 2010.
 - [43] FAO, “Uso agrícola del agua.” [Online]. Available: <http://www.fao.org/docrep/005/Y3918S/y3918s03.htm>. [Accessed: 14-Jul-2018].
 - [44] Alcaldía del Rosal, “Diagnóstico Municipio del Rosal,” no. 7, p. 62, 2012.
 - [45] El tiempo, “SUBACHOQUE SE ESTÁ SECANDO.” [Online]. Available: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-304319>. [Accessed: 14-Jul-2018].
 - [46] M. A. y D. . F.-S. de I. G. y de A. Iniciativa Ganadería, “Impacto de la ganadería en la disponibilidad y la calidad del agua,” pp. 1–2, 2001.
 - [47] C. Boyer, R. Lewis, and C. K. Miller, “Gas de lutitas : Un recurso global,” *Oilf. Rev.*, vol. 23, no. 3, pp. 28–39, 2011.
 - [48] “Propiedades térmicas de las rocas,” pp. 1–12, 2012.
 - [49] J. Suarez, “Litología y Estructura Geológica,” pp. 151–190.
 - [50] A. Pérez, “La estructura ecológica principal de la Sabana de Bogotá,” *Soc. Geográfica Colomb. Acad. Ciencias Geográficas*, pp. 1–37, 2000.
 - [51] “Permeabilidad,” pp. 1–5.
 - [52] Cornell University, “TEXTURA DEL SUELO,” *Agriculture*.
 - [53] A. Regal, “La ingeniería del suelo.”
 - [54] Y. Calderón, “Desarrollo Cartografía Edáfica Aplicado a la Ingeniería en la Sabana de Bogotá,” *Proy. Compil. y Levantamiento la Inf. Geomecánica.*, vol. V, p. 52, 2005.
 - [55] E. Juliet and R. Güina, “ANÁLISIS DE LAS VARIACIONES DE NIVELES PIEZOMÉTRICOS DEL COMPLEJO ACUÍFERO CUATERNARIO, REGISTRADOS DENTRO DE POZOS PROFUNDOS, POR LA CAR, ENTRE 1998 Y 2007, EN LA SABANA DE BOGOTÁ,” pp. 1–87, 2016.