

**EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DEL SISTEMA DE ACUÍFEROS
PRESENTE EN LA VEREDA DE LA PUNTA (TENJO, CUNDINAMARCA),
BAJO LA METODOLOGÍA DRASTIC**

DANIEL FELIPE ROJAS LÓPEZ

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: ORDENAMIENTO AMBIENTAL DEL
TERRITORIO Y GESTIÓN AMBIENTAL
Bogotá D.C
MAYO DEL 2025**

**EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DEL SISTEMA DE ACUÍFEROS
PRESENTE EN LA VEREDA DE LA PUNTA (TENJO, CUNDINAMARCA),
BAJO LA METODOLOGÍA DRASTIC**

Autor:

Daniel Felipe Rojas López

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
AMBIENTAL**

DIRECTOR

ING. Camilo Andrés Rojas Cruz

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: ORDENAMIENTO AMBIENTAL DEL
TERRITORIO Y GESTIÓN AMBIENTAL**

Bogotá D.C

2025

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de una u otra manera a la realización de este trabajo de grado, en especial a los profesores Darwin Mena Rentería y Camilo Vargas Terranova que inspiraron en mí el gusto y pasión por la investigación del recurso hídrico.

En primer lugar, agradezco al profesor Camilo Andrés Rojas Cruz, mi director de trabajo de grado, por su invaluable orientación, dedicación y apoyo constante durante el desarrollo de este trabajo de grado.

A la universidad Santo Tomas, por brindarme los recursos académicos, el conocimiento y el sentimiento de hogar en cada una de sus aulas y espacios durante todo el tiempo que hice parte de esta.

A todos los docentes que estuvieron conmigo en el transcurso de mi carrera, quienes con sus enseñanzas y exigencia académica me formaron profesionalmente y me motivaron a dar siempre lo mejor de mí.

A mi familia, por su amor incondicional, apoyo emocional y confianza en cada paso de este camino.

A mis amigos y compañeros de carrera, con quienes compartí diversos logros, situaciones y anécdotas que serán guardadas con mucho cariño y aprecio

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo primeramente a mi familia; mi hermano Juan Carlos, mi mama Isabel y mi papa Héctor; los cuales fueron el motor y apoyo principal para culminar este gran desafío lleno de aprendizajes y logros.

A mis amigos de carrera y compañeros de carrera, con los que compartí muchos años llenos de diversión, camaradería y anécdotas incontables.

A mis mejores amigos que encontré durante mis años de carrera, Sergio y Sebastián, los cuales se convirtieron en hermanos para mí.

A mis mejores amigos de toda la vida, Michael y Daniel Enrique, que son la hermandad eterna.

Dedicado especialmente a S.M.R

Con cariño

Daniel Felipe

TABLA DE CONTENIDO.

RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
1.INTRODUCCION	3
2.OBJETIVOS.....	5
2.1 Objetivos generales.....	5
2.2 Objetivos específicos	5
3.ANTECEDENTES.....	5
3.1 América del norte.....	6
3.2 Europa.....	7
3.3 Asia y la región de medio oriente.....	8
3.4 África.....	9
3.5 América del sur y Colombia	11
4.MARCO TEORICO	12
4.1 Marco conceptual	12
4.1.1 Clasificación de acuíferos de acuerdo con el grado de confinamiento.....	12
4.1.1.1 Acuíferos libres.....	13
4.1.2 Clasificación de acuerdo con el material geológico	14
4.1.2.1 Acuíferos de gravas y arenas	14
4.1.2.2 Acuíferos kársticos.....	14
4.1.3 clasificación de acuerdo con su origen	14
4.1.3.1 Acuíferos sedimentarios	14
4.1.3.2 Acuíferos volcánicos.....	14
4.1.2 Vulnerabilidad en los acuíferos	14
4.1.3 Metodologías para la evaluación de vulnerabilidad en acuíferos.....	16
4.1.3.1 Métodos basados en índices y mapas	16
4.1.3.2 Métodos basados en modelos estadísticos o probabilísticos.....	16
4.1.3.3 Métodos Basados En Procesos Físicos o Modelos de simulación.....	17
4.1.3.4 Métodos Integrados o Multicriterio	17
4.1.4 Aplicación De Métodos Basados En Índices y Mapas	17
4.1.4.1 Metodo GOD.....	18
4.1.4.2 Metodo SINTACTS	19

4.1.4.3 Metodo DRASTIC	20
4.2 Marco De Referencia	21
4.2.1 Área De Estudio	21
4.3.2 Geología e Hidrogeología	26
4.4 Marco Legal	27
5.METODOLOGIA	32
5.1 Fase N°1	33
5.2 Fase N°2	33
5.3 Fase N°3	34
5.4 Descripción de las fases de la metodología	34
6.ANALISIS DE RESULTADOS	40
6.1. Profundidad del nivel freático	40
6.2 Recarga neta	42
6.3 Litología del acuífero	44
6.4 Tipo de suelo	47
6.5. Topografía	49
6.6 Naturaleza de la zona no saturada	51
6.7 Conductividad hidráulica.	53
6.8 Índice de vulnerabilidad DRASTIC	55
6.8.1. Resultados por variable	56
6.9 Zonificación estratégica ambiental	62
7. IMPACTO SOCIAL Y HUMANÍSTICO DEL PROYECTO	64
8.CONCLUSIONES	65
9.RECOMENDACIONES	67
10.REFERENCIAS	68

TABLA DE FIGURAS.

Figura 1.Mapa de la ubicación de la vereda La Punta	23
Figura 2. Límites de la provincia hidrogeológica de la Cordillera oriental	26
Figura 3.Mapa del parámetro de profundidad del nivel freático, vereda la Punta.	40

Figura 4. Mapa del parámetro de recarga neta, vereda la Punta.....	43
Figura 5. Mapa de la unidad cronoestratigráfica, vereda la Punta.....	45
Figura 6. Mapa del parámetro de litología del acuífero, vereda la Punta.	47
Figura 7. Mapa del parámetro de tipo de suelo, vereda la Punta.....	48
Figura 8 Mapa de las pendientes topográficas de la vereda la Punta.....	49
Figura 9. Mapa del parámetro de topografía, vereda la Punta.	51
Figura 10. Mapa del parámetro de la naturaleza de la zona no saturada, vereda la Punta.....	53
Figura 11. Mapa del parámetro de conductividad hidráulica, vereda la Punta.	55
Figura 12 Mapa del índice de vulnerabilidad de la vereda la Punta.	60
Figura 13. Mapa de la propuesta de zonificación estratégica ambiental en la vereda la Punta.....	62

TABLA DE TABLAS.

Tabla 1. Marco legal del proyecto	27
Tabla 2. Fase 1 de la metodología del proyecto	33
Tabla 3 Fase 2 de la metodología del proyecto	33
Tabla 4. Fase 3 de la metodología del proyecto	34
Tabla 5 tabla general del índice de vulnerabilidad DRASTIC	37
Tabla 6. resultados variables del nivel freático.....	56

Tabla 7. resultados variables de la recarga neta	56
Tabla 8. resultados variables de la litología del acuífero	57
Tabla 9. resultados variables del tipo de suelo	57
Tabla 10. resultados variables de la topografía	58
Tabla 11. resultados variables de la naturaleza de la zona no saturada	58
Tabla 12. resultados variables de la conductividad hidráulica	59
Tabla 13. Proporción de los resultados de los indicadores en area (h)	62

TABLA DE GRAFICAS.

Grafica 1.Histograma de precipitaciones por meses en el municipio de Tenjo, Cundinamarca.....	25
--	----

RESUMEN

El recurso hídrico subterráneo constituye uno de los pilares fundamentales para el funcionamiento y el desarrollo social, económico y ambiental de los seres vivos. De allí la importancia de su constante monitoreo y protección, mediante planificaciones sostenibles y una gestión adecuada de estas reservas estratégicas. La Vereda de La Punta, ubicada en el municipio de Tenjo, ha hecho uso del recurso hídrico subterráneo desde hace varias décadas debido a las condiciones favorables de los suelos y el subsuelo de esta región, que generan un punto clave para la formación de estructuras que albergan y contienen el recurso hídrico, denominadas generalmente como acuíferos. Sumado a lo anterior, la falta de afluentes superficiales en la vereda ha provocado que, con el paso del tiempo, el recurso hídrico se haya visto alterado y afectado debido al crecimiento de la demanda sobre su uso para actividades antropogénicas y de abastecimiento a la población residente, tanto de la vereda como también del municipio. El presente trabajo, basado en la necesidad de conocer el estado actual del sistema de acuíferos en la vereda La Punta, implemento la metodología DRASTIC, con la finalidad de evaluar la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación que actualmente enfrenta el recurso hídrico subterráneo en la zona; lo anterior para generar decisiones y reglamentaciones por parte de las autoridades ambientales y locales, con el fin de mejorar la protección temprana de este medio indispensable para el desarrollo de las relaciones tanto bióticas, abióticas y sociales. Los resultados obtenidos se presentaron mediante el uso del software ArcGIS 10.8, en donde en conjunción con los parámetros establecidos por DRASTIC, se obtuvieron siete mapas temáticos respecto a los siete parámetros analizados por esta metodología. La unión de los mapas mediante herramientas SIG, expuso el estado actual de los sistemas de acuíferos que interactúan con la zona de La punta, distinguiendo que la vulnerabilidad media frente a la contaminación se vio reflejada en mayor medida

en los sectores occidental y oriental, mientras que la vulnerabilidad de características mínimas se plasmó en la planicie central del municipio. Lo anterior se basó en la información de los pozos existentes y activos en el lugar de estudio, además de la configuración del suelo que afecta de manera directa los factores que pueden facilitar la contaminación de los acuíferos por parte de algún elemento o sustancia. Por último, se tomaron los resultados obtenidos del mapa final de vulnerabilidad para la realización de una propuesta de zonificación estratégica ambiental que ayudaría a la correcta gestión integral del recurso al delimitar zonas basadas en su posible nivel de contaminación frente a actividades antropogénicas.

ABSTRACT

Groundwater resources constitute one of the fundamental pillars for the functioning and social, economic, and environmental development of living beings. Hence the importance of their constant monitoring and protection through sustainable planning and proper management of these strategic reserves. The La Punta village, located in the municipality of Tenjo, has made use of groundwater resources for several decades due to the favorable soil and subsoil conditions of this region, which create a key junction for the formation of structures that house and contain water resources, generally referred to as aquifers. In addition, the lack of surface tributaries in the village has meant that, over time, the water resource has been altered and affected by the growing demand for its use for anthropogenic activities and for supplying the resident population, both in the village and the municipality. This work, based on the need to know the current state of the aquifer system in the La Punta area, implemented the DRASTIC methodology, with the purpose of evaluating the intrinsic vulnerability to contamination that the groundwater resource currently faces in the area; this to generate decisions and regulations by environmental and local authorities, in order to improve the early protection of this essential medium for the development of biotic, abiotic and social relationships. The results obtained were presented through the use of ArcGIS 10.8 software, where in conjunction

with the parameters established by DRASTIC, seven thematic maps were obtained with respect to the seven parameters analyzed by this methodology. The union of maps using GIS tools exposed the current state of the aquifer systems that interact with the La Punta area, distinguishing that the average vulnerability to contamination was reflected to a greater extent in the western and eastern sectors, while the vulnerability of minimal characteristics was reflected in the central plain of the municipality. The above was based on information from existing and active wells at the study site, as well as soil configuration, which directly affects factors that can facilitate aquifer contamination by certain elements or substances. Finally, the results obtained from the final vulnerability map were used to develop a strategic environmental zoning proposal that would aid in the proper comprehensive management of the resource by delimiting areas based on their potential level of contamination due to anthropogenic activities.

1.INTRODUCCION

El análisis y estudio de la vulnerabilidad de los sistemas acuíferos es esencial para una gestión eficiente de los recursos hídricos, dado que múltiples factores pueden afectar las complejas interacciones internas de estos sistemas, lo que puede provocar una recuperación más lenta del acuífero y un mayor riesgo de implicaciones negativas a futuro; por lo cual es esencial la utilización de estos estudios para prever y minimizar los peligros potenciales. Lo anterior especialmente en zonas donde el uso de agua subterránea es importante e indispensable para el desarrollo socioeconómico, el mantenimiento de ecosistemas y de la infraestructura social. En este sentido, la vereda de La Punta, ubicada en el municipio de Tenjo, Cundinamarca, representa un caso de estudio relevante debido a la demanda creciente de agua subterránea, impulsada por actividades agrícolas, industriales y domésticas (Gómez ,2017). Esta situación genera una preocupación sobre la posible contaminación y degradación de los acuíferos, que podría comprometer la calidad y disponibilidad de este recurso en el futuro, lo cual conllevaría a un cambio en las dinámicas

sociales presentes en la población actual y futura del sector tanto de Tenjo, como de la vereda de la Punta (Gómez, 2017).

Este trabajo pretende evaluar la vulnerabilidad del sistema de acuíferos en la vereda de La Punta aplicando la metodología DRASTIC, reconocida tanto nacional como internacionalmente debido a su alto nivel de adaptación que genera una serie de estimaciones de carácter cuantitativo sobre el posible riesgo de contaminación de los acuíferos (Pacheco et al., 2015). DRASTIC es un acrónimo que representa siete parámetros hidrogeológicos clave: profundidad del nivel freático, recarga neta, litología del acuífero, tipo de suelo, topografía, naturaleza de la zona no saturada y conductividad hidráulica. Cada parámetro se evalúa y pondera para generar un índice de vulnerabilidad que permita identificar áreas de mayor susceptibilidad a la contaminación (Pacheco et al., 2015).

Una vez identificados y ponderados los valores arrojados por la metodología, se aplica un análisis basado en sistemas de información geográfica (SIG), para este caso el uso de la herramienta ArcMap 10.8; de donde se obtendrán como resultado una serie de mapas que expresarán los niveles de vulnerabilidad del área en estudio y con el que se pretende generar la zonificación estratégica como uno de los resultados finales.

Este estudio se basa en la necesidad de desarrollar herramientas adaptables que generen un beneficio potencial a las autoridades locales y regionales, cómo es el caso más representativo de la CAR (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca). Esto para realizar decisiones informadas sobre la gestión y protección de los acuíferos actualmente descubiertos y adecuados para su uso, como también de aquellos sistemas que actualmente permanecen en desconocimiento. Este tipo de evaluación es particularmente relevante en la vereda de La Punta, donde el uso intensivo del suelo y la posible interacción con fuentes de contaminación podrían generar impactos significativos sobre la calidad del recurso hídrico. Sumado a lo anterior, los resultados finales del documento pueden provocar una mejora la formulación de políticas de

ordenamiento territorial y diferentes normativas que incluyan medidas de protección del recurso hídrico, garantizando su sostenibilidad

2.OBJETIVOS

2.1 Objetivos generales

Evaluar la vulnerabilidad del sistema de acuíferos presentes en la vereda La Punta, perteneciente al Municipio de Tenjo, mediante la aplicación de la metodología DRASTIC.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar y mapear los parámetros clave de la metodología DRASTIC en la Zona de interés.
- Calcular y analizar la puntuación de vulnerabilidad de los acuíferos en función de los parámetros evaluados y seleccionados para el área de estudio.
- Generar una zonificación estratégica para la gestión del recurso con base en los resultados del estudio.

3.ANTECEDENTES

El estudio de la vulnerabilidad de los acuíferos ha sido un área de investigación fundamental en la hidrogeología de los distintos países que hacen uso de estos medios; debido a un posible aumento del riesgo de contaminación de las estructuras pertenecientes a los recursos hídricos subterráneos. La metodología DRASTIC, desarrollada por (Aller et al., 1987), ha sido globalmente utilizada para generar una evaluación integrada y con altos niveles de similitud a las condiciones reales de los acuíferos. DRASTIC se basa en la integración de siete parámetros hidrogeológicos, lo que produce resultados basados en los índices

de vulnerabilidad, los cuales pueden ser aplicado en distintas regiones del mundo.

A continuación, se presentan referencia de estudios realizados en diferentes partes de Colombia, distintos países y continentes basados en el uso de la metodología DRASTIC con el fin de generar

3.1 América del norte

La aplicación de la metodología DRASTIC se ha utilizado por su capacidad de emitir consideraciones relativamente precisas y acertadas acordes al lugar y área donde se emplea, abarcando varios contextos hidrogeológicos. En los Estados Unidos, lugar donde fue rigurosamente diseñada por la agencia de protección ambiental de Estados Unidos (con sus siglas en inglés, EPA) se tiene un registro numeroso y amplió sobre el uso de la metodología DRASTIC para evaluar la vulnerabilidad de acuíferos, uno de ellos principalmente en Mountain Home ciudad perteneciente al condado de Elmore , en el estado de Idaho; este estudio llevado a cabo en el año 2015, se enfocó en la contaminación por nitratos en una serie de acuíferos que son los encargados de suministrar el 80% del agua a las comunidades presentes en esta ciudad debido a sus condiciones climáticas áridas. Este estudio demostró cómo la metodología DRASTIC puede ser efectiva en identificar áreas con alto riesgo de contaminación aplicando un modelo de aguas subterráneas para delinear espacialmente el riesgo, según la información secundaria y primaria obtenida de 26 pozos, destacando la importancia de los parámetros relacionados con la profundidad del nivel freático y la recarga anual en zonas con climas propensos a la sequía y a la aridez (Dorsey, 2015).

Otro estudio estrechamente relacionado es el de Voutchkova et al., (2021) en Kansas, donde se utilizó DRASTIC para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos frente a contaminantes agrícolas a base de nitratos. En este trabajo se utilizó una variación de la metodología DRASTIC, que corresponde a DRASTIC-N, donde se generó y aplicó un nuevo parámetro de evaluación aparte de los siete parámetros geológicos e hidrogeológicos utilizados por la metodología

convencional, este último parámetro basado en la geoquímica del suelo bajo condición redox. Lo anterior resaltó la utilidad de incorporar parámetros adicionales a la metodología DRASTIC o para mejorar la precisión de los índices de vulnerabilidad, especialmente en áreas donde la calidad del suelo y la geoquímica de este tienen una influencia significativa en la movilidad de los contaminantes, en especial de los nitritos. Los resultados de este estudio fueron fundamentales para la gestión del uso de pesticidas y fertilizantes en la región, generando prácticas agrícolas más sostenibles.

3.2 Europa

La metodología DRASTIC se ha aplicado en varios contextos geográficos y ambientales. En Europa, más específicamente en España, en el año 2015, en la región altamente agrícola conocida como Barrax ubicada en la provincia de Albacete se evaluó la vulnerabilidad de los sistemas de acuíferos presentes en esta zona, mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG) con el fin de generar un mapeo mucho más preciso de la mano con información de mapas generados por instrumentos de ordenación territorial españoles.

La unión de estos diferentes instrumentos generó unos resultados basados en el nivel de desarrollo del área seleccionada en donde las áreas presentaban bajos niveles de vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas debido al mínimo desarrollo urbano presente en la zona lo cual conlleva por el mismo motivo a un desarrollo industrial bajo. Caso contrario arrojó la vulnerabilidad a la contaminación proveniente de actividades agrícolas, las cuales son las responsables de la presión sobre el recurso hídrico del municipio de Barrax, arrojando cifras cercanas al 50 % de vulnerabilidad media debido a las labores agrícolas que predominan allí. (Bartzas et al., 2015)

Otro caso de estudio en donde la metodología DRASTIC fue implementada es en Italia, en una de las regiones más importantes de este país como lo es la Campania, que alberga de capital a la ciudad de Nápoles, en esta se desarrolló un estudio en el año 2020 en donde se propuso un método para la evaluación de la vulnerabilidad de la serie de sistemas de acuíferos presentes en el área

denominada la llanura de Campania ,bajo la suposición de que la química presente en el suelo de la llanura en cierta medida afectaba la infiltración e incorporación del agua a los sistemas de aguas subterráneas que en su gran mayoría son los responsables de abastecer la región del área metropolitana de Nápoles; lo anterior conllevó a que en el estudio se incorporara un índice geoquímico de grado contaminación del suelo junto con la metodología de vulnerabilidad DRASTIC.(Catani et al., 2020) El estudio arrojó que la metodología DRASTIC no era tan eficaz en entorno netamente urbanos, debido a que no se contemplaban las múltiples contribuciones del factor humano, por lo cual es recomendable según el estudio las combinaciones de diferentes índices geoquímicos junto a los índices hidrogeológicos y geológicos presentados por la metodología DRASTIC con el fin de obtener un detallado y claro resultado de los grados de vulnerabilidad tanto en áreas rurales, semiurbanas y urbanas. Este estudio también destacó la importancia de adaptar el modelo a las condiciones específicas de la cuenca, considerando factores como la variabilidad estacional de la recarga y la heterogeneidad del medio acuífero ((Catani et al., 2020)

3.3 Asia y la región de medio oriente

La metodología DRASTIC ha sido aplicada en regiones con desafíos hidrogeológicos bastante significativos. Un estudio destacado es el realizado en el país de la India en la cuenca del Ganges, en la región dividida entre los ríos Hindon y Yamuna. En esta área se evaluó la vulnerabilidad de los acuíferos debido a la sobreexplotación de estos para fines agrícolas, industriales y de consumo humano. Lo anterior sumado a la falta de hallazgos de acuíferos subterráneos por encima de 126 metros creó la necesidad de generar este estudio basados en el uso del modelo DRASTIC-LU, el cual retoma las características e indicadores geológicos e hidrogeológicos de la metodología DRASTIC convencional junto a el indicador de uso del suelo, lo cual conlleva a una serie de interacciones más específicas que generan un mapa de vulnerabilidades de las aguas subterráneas más detalladas. El estudio arrojó que el 49% del área seleccionada para el estudio, sufría un grado de vulnerabilidad alta, sumado al 11% que se obtuvo para una calificación de muy alta. La

aplicación de DRASTIC en esta región mostró cómo la metodología puede ser utilizada para identificar áreas con alto riesgo de contaminación, ayudando a focalizar los esfuerzos de monitoreo y remediación en las zonas más críticas las cuales fueron el área más representativa de este estudio (Alam et al., 2014)

Jordania hace parte de la lista de los países con uno de los climas más áridos del mundo, lo cual conlleva a que los recursos hídricos presentes en este sean extremadamente limitados. Los principales acuíferos del país incluyen el Sistema de Montañas de Jordan, el Acuífero de Disi y el Acuífero de Azraq, cada uno con desafíos significativos como la sobreexplotación y la contaminación. Un estudio aplicado en las cuencas Amman Zarqa y Azraq para el año 2015 arrojó una serie de resultados sobre la calidad de la serie de acuíferos de características poco profundidad que se encuentran en las áreas de estudio de las dos cuencas anteriormente mencionadas, resaltando el nivel de vulnerabilidad alto en la que se encontraba la mayoría de acuíferos que estaban a una profundidad menor a los 50 metros, debido a sus características friables y frágiles lo cual conllevaba que las ponderaciones obtenidas de los índices de la metodología DRASTIC, arrojaran el alto nivel de vulnerabilidad a contaminantes antropogénicos debido a su alta densidad poblacional e industrial que ocurren en el área de estudio. (Mohammad et al., 2015)

3.4 África

El continente africano posee una cantidad relativamente media de acuíferos clave para el suministro de agua en sus diversas regiones y países. Parte de esos acuíferos presentan una característica “fossilizada” debido a que se formaron hace miles o cientos de miles de años, y debido a diversos acontecimientos geológicos e hidrogeológicos perdieron la capacidad de recarga de diversas fuentes por lo cual esta agua presente en ellos quedó sellada y atrapada. El Acuífero Nubio, uno de los mayores acuíferos fósiles del mundo, se extiende por Egipto, Sudán y Libia, suministrando agua en el árido noreste del continente. El Acuífero de Kalahari, en el sur de África, es crucial para el suministro en Botswana, Namibia y Sudáfrica, mientras que el Acuífero de la Cuenca del Congo, en el centro, almacena unas cantidades considerables del

recurso hídrico debido a que la reservas en una región con abundantes precipitaciones.

Según Ewusi et al., (2016) en el estudio realizado en la asamblea metropolitana de Kumasi, Ghana; se identificó por medio de análisis apoyados en los indicadores hidrogeológicos de la metodología DRASTIC que la vulnerabilidad de los acuíferos presentes en la región tenían un influencia sobre la constitución del subsuelo en donde se encontraban estos, dando así una serie de resultados divididos en dos aportes, en donde el flanco oriental y occidental constituidos mayormente por granitos posee una vulnerabilidad según DRASTIC mucho más alta que el flanco norte y central constituido por filitas. Los primeros obtuvieron rangos “muy altos” de vulnerabilidad en los sistemas de acuíferos presentes en estos mientras que los segundos obtuvieron rangos de vulnerabilidad “bajos y muy bajos”. Este estudio proporcionó información crucial para la gestión de recursos hídricos en una región donde el recurso hídrico extraído de los acuíferos son una fuente altamente necesaria para el consumo humano y agrícola.

En Sudáfrica, en el año 2021 se llevó a cabo un estudio en donde se realizó la evaluación de vulnerabilidad de los sistemas de acuíferos presentes en la cuenca cuaternaria denominada “A21C” perteneciente a la cuenca del río Limpopo. Esta evaluación se llevó a cabo bajo la metodología DRASTIC en donde se evidencio que el factor que más influía en el nivel de vulnerabilidad otorgado por los indicadores de la metodología pertenecía a la profundidad del acuífero o del sistema de acuíferos, lo cual conllevó a que por medio de un mapa de vulnerabilidad mediante sistemas de información geográfica, se observara y analizara que las partes centrales y occidentales del área de estudio de la subcuenca, presentaban valores expresados en rangos de alta vulnerabilidad, esto debido a varios factores como el tipo de suelo presente y la topografía del mismo; lo anterior sumado a que en dichas áreas, se encuentran masivos puntos de captación del recurso hídrico (Moges & Dinka, 2021). Uno de los resultados fundamentales del análisis de vulnerabilidad realizado sobre la cuenca “A21C” ha sido fundamental para guiar las políticas de gestión de agua subterránea en

una región clave para la agricultura sudafricana según posteriores estudios de la FAO en el año 2022.

3.5 América del sur y Colombia

Para los casos de estudio de perteneciente a la zona de América del sur, se puede destacar el realizado en el país ecuatoriano en el año 2016 en donde se realizó una evaluación de vulnerabilidad para la unidad hidrogeológica ubicada para la ciudad de Huaquillas, ciudad de la provincia de El Oro. En este análisis se comparó los resultados obtenidos con base a dos metodologías, siendo estas DRASTIC Y GOD; de acuerdo con lo anterior se analizó la zona hidrológica en tres secciones, siendo cuenca baja, cuenca media y cuenca alta ,arrojando una serie de resultados de rangos de vulnerabilidad en donde debido a los potenciales de dispersión de las áreas analizadas junto a los acuíferos se dio como conclusión que la cuenca alta posee un menor grado de exposición a las diferentes actividades antropogénicas(Alulema Del Salto & López Vera, 2016).

Enfocado en casos de estudios en Colombia, se puede analizar el realizado en Puerto Boyacá, en el departamento de Boyacá, donde en 2016 se analizó la vulnerabilidad del acuífero presente en la formación Mesa. Los acuíferos pertenecientes a esta formación presentan características de acuíferos libres y semiconfinados con una constitución de arenas y gravas; para este caso se realizó la evaluación bajo la metodología DRASTIC, en donde los resultados encontrados se plasmaron en criterios de vulnerabilidad bajos, moderados, altos y muy altos. El área perteneciente al piedemonte presento vulnerabilidad moderada mientras que el área correspondiente a parte de la zona urbano presento vulnerabilidad muy alta ((GARCÍA & SARMIENTO, 2016).

Por último, el estudio de caso realizado en el año 2021 en el departamento de Cundinamarca, más específicamente en el municipio de Tenjo y cota, donde se realizó mapas por cada indicador correspondiente a la metodología DRASTIC para la realización del mapa general de la vulnerabilidad del sistema de acuíferos presentes en el área de estudio. Lo anterior resulta en los rangos más altos de

vulnerabilidad en la zona nororiental por la constitución en su mayoría de depósitos de gravas (Torres Quintero et al., 2015).

4.MARCO TEORICO

4.1 Marco conceptual

La definición de un sistema de acuíferos se puede expresar desde la unidad más simple como lo es un acuífero, el cual corresponde a una formación de carácter geológico que es la encargada de permitir el almacenamiento y a su vez el flujo del recurso hídrico subterráneo; lo anterior debido a las múltiples características que hacen parte la estructura de los acuíferos, destacando de las demás características la porosidad y la capacidad de permeabilidad condicionada bajo un gradiente hidráulico. Las cantidades en las que un acuífero puede almacenar el recurso hídrico varía de acuerdo con una serie de factores e interacciones que ocasionan las diferentes clasificaciones de acuíferos existentes (Tuinhof et al., 2002).

4.1.1 Clasificación de acuíferos de acuerdo con el grado de confinamiento

Los acuíferos pueden clasificarse según el grado en que están confinados por formaciones geológicas que determinan el flujo del recurso hídrico subterráneo. La clasificación bajo esta metodología genera un mayor grado del entendimiento sobre las dinámicas internas y externas de los sistemas de acuíferos, esenciales para los diferentes factores de recarga, provisión y vulnerabilidad intrínseca.

4.1.1.1 Acuíferos libres

De acuerdo con Sánchez, (2022), los acuíferos denominados libres o no confinados son las estructuras en donde el recurso hídrico subterráneo se encuentra sin un límite por encima de este que cumpla una función de retenerlo, lo anterior significa que se encuentra a presión atmosférica. Debido a la cercanía de estos a la superficie, son los más susceptibles y con un alto nivel de vulnerabilidad a factores contaminantes tanto naturales como a su vez de carácter antropogénico.

4.1.1.2 Acuíferos semiconfinados

Los acuíferos de carácter semiconfinado tienen como características principales la existencia de un límite superior semipermeable, esto produce que el flujo del recurso hídrico subterráneo este condicionado de manera parcial, lo cual influye en que parte del flujo total del recurso hídrico pueda que sufrir una infiltración en la estructura del acuífero mientras la parte restante no sufra el mismo caso. La distancia en la que estos acuíferos habitualmente se encuentran, es superior al de los acuíferos libres, por lo tanto, el nivel de vulnerabilidad de estos es inferior debido a que el nivel de infiltración en tiempo es mucho mayor, por lo cual el retraso del movimiento disminuye el riesgo de contaminación mas no lo elimina por completo (Leyva, 2010).

4.1.1.3 Acuíferos confinados

Tomando la definición de acuífero confinado desarrollado por (Abu-Bakr, 2020) ,es aquella estructura en donde las capas que la forman son de carácter impermeable, lo cual genera que no exista una interacción directa con la atmosfera, además de que genera que el recurso hídrico se encuentre a una presión superior al de la atmosfera, la cual varía de acuerdo a la profundidad y característica del material que está formado el mismo acuífero.

4.1.2 Clasificación de acuerdo con el material geológico

4.1.2.1 Acuíferos de gravas y arenas

La clasificación basada en los materiales que constituyen el acuífero se puede clasificar en la formada por los materiales correspondientes a las arenas y las gravas; debido a las características de estas, los acuíferos suelen tener un potencial de permeabilidad mayor, lo cual genera que a su vez el movimiento del agua aumente (Ordoñez, 2021).

4.1.2.2 Acuíferos kársticos

La formación de estos acuíferos se basa en la estructura de las rocas fisuras o en otros casos en series de cavidades que producen un avance favorable de la infiltración del recurso hídrico (Vallejos et al., 2021).

4.1.3 clasificación de acuerdo con su origen

4.1.3.1 Acuíferos sedimentarios

Los acuíferos sedimentarios presentan una característica entorno a su formación, debido a que están constituidos por materiales como las gravas, arenas y una amplia clasificación de limos (Vallejos et al., 2021).

4.1.3.2 Acuíferos volcánicos

Los acuíferos volcánicos presentan una característica entorno a su formación, debido a que están constituidos por rocas ígneas, debido a su heterogeneidad en los materiales que lo constituyen, presentan una serie de propiedades hidráulicas óptimas y versátiles que varían dependiendo de varios factores como lo son la fracturación y los diferentes tipos de intrusión que pueden generar cambios en estos sistemas de acuíferos (Madrigal-Solís et al., 2017).

4.1.2 Vulnerabilidad en los acuíferos

La gestión sostenible de los recursos hídricos representa una necesidad imperante en la actualidad, basado en la creciente presión sobre la disponibilidad y calidad del agua a nivel global para múltiples usos como lo son el consumo

humano, actividades industriales, agricultura y demás dinamismos en las que el recurso hídrico sea una materia prima esencial. En el contexto actual, la evaluación y control de estos componentes hídricos debe garantizar la subsistencia de la dinámica hídrica y de la misma dinámica humana y ambiental, por lo que las evaluaciones de vulnerabilidad emergen como una herramienta importante para comprender y mitigar los impactos adversos que pudieran llegar a tener estos recursos, enfocándose en los recursos hídricos subterráneos (Torres Quintero et al., 2015).

La acción de evaluar la vulnerabilidad de los sistemas de acuíferos de una zona específica frente a la posible generación de contaminación tanto natural como antropogénica que se pudiera presentar se suele organizar en una serie de niveles expresados como bajo, medio, alto, muy alto y extremo. Una vez obtenido la información y relacionado con la serie de clasificación estos resultados se plasman en mapas denominados de característica temáticos, que abarcan una zona específica de estudio. Estos mapas, posteriormente a su realización, se deben corroborar y a su vez analizar con el fin de crear consideraciones para ser aplicados en la elaboración de políticas públicas y planes de ordenamiento territorial. (MADS, 2012)

La evaluación de la vulnerabilidad de los sistemas hídricos subterráneos, siendo los acuíferos los más representativo, es una labor que viene evolucionando y aplicándose en las últimas décadas debido a la importancia de estos en los diversos aspectos del desarrollo humano; es debido a lo anterior que las metodología de evaluación de la vulnerabilidad en acuíferos ha evolucionado como respuesta a esta necesidad, apoyándose en la integración de variables e índices que permiten una evaluación holística. Para Colombia el uso de los diferentes métodos para la evaluación de la vulnerabilidad tiene ciertos grados de dificultades debido a múltiples causales y factores como lo son la baja cantidad de información y datos recopilados en el transcurso de años determinados, lo cual aplica un grado de dificultad a la hora de la realización y aplicaciones de estos métodos.

De lo anterior radica la necesidad de la realización de representaciones de los lineamientos más complejos contenidos en las dinámicas hidrológicas subterráneas y que son expresados mediante la simplificación y simulación de estos en modelos , ya sean de carácter únicos o bien relacionados con modelos hidrogeológicos conceptuales los cuales otorgan un mayor grado de exactitud en variadas situaciones en los que los sistemas de acuíferos se pudieran ver inmersos y que por acción de estos requieran la toma de diferentes decisiones en distintos ámbitos como lo es la gestión del riego, protección frente a situaciones y/o contaminantes y por último, la disponibilidad del recurso hídrico para la población actual o futura.(Betancur-Vargas et al., 2017)

4.1.3 Metodologías para la evaluación de vulnerabilidad en acuíferos

Los métodos de evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos frente a la contaminación suelen clasificarse debido a diferentes características en los cuales pueden agruparse, por lo tanto, los grupos principales varían dependiendo el contexto de aplicación y los diferentes autores que sean consultados. Según Oke, (2017), existen una serie de clasificaciones divididas en 4 importantes grupos, a continuación, se presentan dichos grupos:

4.1.3.1 Métodos basados en índices y mapas

Estos métodos basados en la realización de mapas finales, generan una serie de parámetros simples y escalas de manera predefinidas o definidas con la finalidad de evaluar la vulnerabilidad. Dentro de esta clasificación se encuentran los métodos más estudiados alrededor del mundo como lo son DRASTIC, GOD, y SINTACS, que reúnen variables basadas en características físicas como profundidad del recurso hídrico, recarga neta, tipo de acuífero o de sistemas de acuíferos, y uso del suelo para generar mapas de vulnerabilidad (Oke, 2017).

4.1.3.2 Métodos basados en modelos estadísticos o probabilísticos

Para esta clasificación, se aplican información basada en datos, los cuales fueron observados mediante diferentes procedimientos, lo anterior con el objetivo de establecer relaciones entre fuentes de contaminación y la posible respuesta a la cual el acuífero puede ofrecer dependiendo sus valores actuales

y pasados. En este caso se aplican las formas más útiles y sencillas de regresión logística junto con la unión analítica de la rama de la geoestadística y sus derivadas entre que se encuentran los modelos bayesianos; la aplicación estadística de todo estos métodos analíticos y estadísticos requieren la presencia y utilización de una gran cantidad de datos, lo cual supone que el área en donde se esté analizando la vulnerabilidad por este método este altamente estudiada y analizada en estudios previos (Oke, 2017).

4.1.3.3 Métodos Basados En Procesos Físicos o Modelos de simulación

La categoría de métodos físicos o de simulación pretende imitar de una manera lo más cerca a la realidad el paso y/o transporte de diferentes tipos de contaminantes que pueden representar una afectación directa o indirecta en el ciclo normal del recurso hídrico subterráneo; esto mediante el uso de múltiples modelos matemáticos que sumados a una programación adecuada ,generaran una aproximación a los procesos que ocurren habitualmente en el flujo del recurso hídrico y su interacción con múltiples fuentes, estos pueden ser la advección, dispersión, difusión, y distintos tipos de reacciones químicas. (Oke, 2017)

4.1.3.4 Métodos Integrados o Multicriterio

Estos crean una unión diversa en los diferentes tipos de enfoques que pueden llegar a tener el recurso hídrico, en este caso subterráneo. En esta unión tenemos los ámbitos de información ambiental, social y económica para una evaluación más detallada y aproximada. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los distintos tipos de análisis multicriterio son utilizados por este método como una forma de generar y tomar una decisión más certera y apropiada respecto a la situación que se esté presentando dentro de la zona y sistema de acuíferos estudiados. (Oke, 2017)

4.1.4 Aplicación De Métodos Basados En Índices y Mapas

La vulnerabilidad residente en los acuíferos debido a múltiples factores tanto naturales como antropogénicos puede ser calculada mediante una evaluación de estos con base a la aplicación de una metodología seleccionada que pueda

adaptarse correctamente a las necesidades y datos que la zona de estudio tenga disponibles. A nivel mundial en la actualidad existen tres metodologías que son esenciales para identificar la susceptibilidad que tienen los sistemas de acuíferos a sufrir deterioros y disminuciones en el flujo del recurso hídrico que estos almacenan debido a factores contaminantes; es por eso que tanto los métodos DRASTIC, GOD Y SINTACS son ampliamente utilizados en áreas de investigación hidrogeológica. (Ourarhi et al., 2024)

4.1.4.1 Metodo GOD

Según (Foster & Hirata, 1991), este método se destaca debido a su característica de poder aplicarse en regiones y áreas en donde la información y los datos pueden ser insuficientes y mínimos; la utilidad de este método radica en la facilidad de aplicación de este debido a la mínima cantidad de factores necesarios para llevar a cabo los resultados de evaluación de vulnerabilidad.

- Factores relacionados con el método GOD:

G- Tipo de acuífero (en ingles Groundwater confinement)

Realiza la clasificación del acuífero de acuerdo con la clasificación por grado de confinamiento como lo es confinado, semiconfinado y libre. (Foster & Hirata, 1991)

O-ocupación de la zona no saturada (en ingles Overlaying Strata)

Analiza la capacidad de las capas del suelo y el tipo de rocas en donde se realiza el estudio, concretamente en el área superior del acuífero. (Foster & Hirata, 1991)

D- Profundidad del agua subterránea (en ingles Depth to ground)

Analiza la profundidad del acuífero con el fin de identificar el nivel de vulnerabilidad en la que se puede encontrar el sistema. (Foster & Hirata, 1991)

4.1.4.2 Metodo SINTACTS

Este método se desarrolló a partir de una variante de la metodología DRASTIC, en donde se aplicó para regiones similares a las de las regiones balcánicas y mediterráneas, por sus características diferenciadas a regiones donde los demás métodos se aplican. Debido a que es una variante de la DRASTIC, utiliza sus mismos factores e índices, pero con diferentes escalas adaptadas a la región en donde se planea evaluar la vulnerabilidad (Chamanehpour et al., 2020)

- Factores relacionados con el método SINTACTS:

S-Suelo (en ingles Soil media)

Describe los factores de infiltración y retención que están presentes en el suelo del área seleccionada para el estudio

I-Impacto de la zona no saturada (en ingles Impact of vadose zone)

Describe la clase de material existente y que conforma el sistema de acuíferos analizado con el fin de poder realizar el estudio de la interacción entre estos y el posible contaminante

N-Recarga neta (en ingles Net recharge)

Realiza la evaluación de la capacidad y el nivel del volumen del recurso hídrico que se encarga de generar una recarga al sistema de acuíferos o únicamente al acuífero en sí.

T-Profundidad del agua (en ingles Depth to water)

Realiza el análisis de la profundidad en donde se encuentra el acuífero con el fin de identificar el nivel de vulnerabilidad en la que se puede encontrar el sistema.

A-Medio acuífero (en ingles Aquifer media)

Realiza el análisis de la capacidad de almacenamiento máximo que posiblemente podría tener el acuífero estudiado en cuestión.

C-Conductividad hidráulica (en ingles Hydraulic conductivity)

Analiza las características de transmisibilidad que el acuífero posee tanto en el recurso hídrico, como en el caso de algún contaminante específico.

S-Topografía (en ingles slope)

Analiza la topografía de la región estudiada, bajo la relación de que la infiltración es afectada por diferentes grados de pendientes

4.1.4.3 Metodo DRASTIC

El método DRASTIC, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (por sus siglas en inglés, EPA) en la década de 1980, se destaca como una herramienta de referencia para generar la evaluación de vulnerabilidad de los sistemas subterráneos de acuíferos, siendo un método efectivo en varias regiones debido a su alta capacidad de acoplarse a las características existentes en los diferentes sistemas de acuíferos ubicados en diferentes partes del mundo (Newell et al., 1990)

DRASTIC, representa las siete variables utilizadas en el método, contiene características importantes para la evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos:

D – Profundidad del agua (Depth to water): Cuanto más cerca esté la superficie freática, mayor será la vulnerabilidad.

R – Recarga neta (Net recharge): Representa la cantidad de agua que recarga el acuífero y que podría arrastrar contaminantes.

A – Medio acuífero (Aquifer media): Se refiere al tipo de material geológico que compone el acuífero, que puede ser más o menos permeable.

S – Suelo (Soil media): Evalúa la capacidad de los diferentes tipos de suelo para filtrar contaminantes.

T – Topografía (Topography): Las pendientes pronunciadas tienden a reducir la infiltración, mientras que las pendientes suaves facilitan la entrada de contaminantes.

I – Impacto de la zona no saturada (Impact of vadose zone): Considera el material geológico por encima del acuífero que puede afectar la filtración de contaminantes.

C – Conductividad hidráulica (Hydraulic conductivity): Define la capacidad del acuífero para transmitir agua y, por lo tanto, contaminantes.

La combinación de estas variables ofrece un enfoque integral para evaluar la susceptibilidad de un acuífero a la contaminación. Es relevante destacar que, aunque inicialmente desarrollado por la EPA de los Estados Unidos, el índice DRASTIC ha trascendido fronteras y se ha utilizado de manera exitosa y adaptado en diversas partes del mundo. Su aplicación no se limita a contextos geohidrológicos específicos, lo que subraya su versatilidad y capacidad para adaptarse a las características particulares de diferentes regiones (Javadi et al., 2011).

La utilidad práctica del índice DRASTIC reside en su capacidad para apoyar la toma de decisiones informadas en la gestión del agua subterránea y la preservación de la calidad del agua. A medida que se enfrentan desafíos globales en la gestión de los recursos hídricos, el índice DRASTIC emerge como un componente esencial en el arsenal de herramientas técnicas para abordar la vulnerabilidad de los acuíferos y promover la sostenibilidad en el uso de estos recursos vitales (Martínez Izaguirre, 2018).

4.2 Marco De Referencia

4.2.1 Área De Estudio

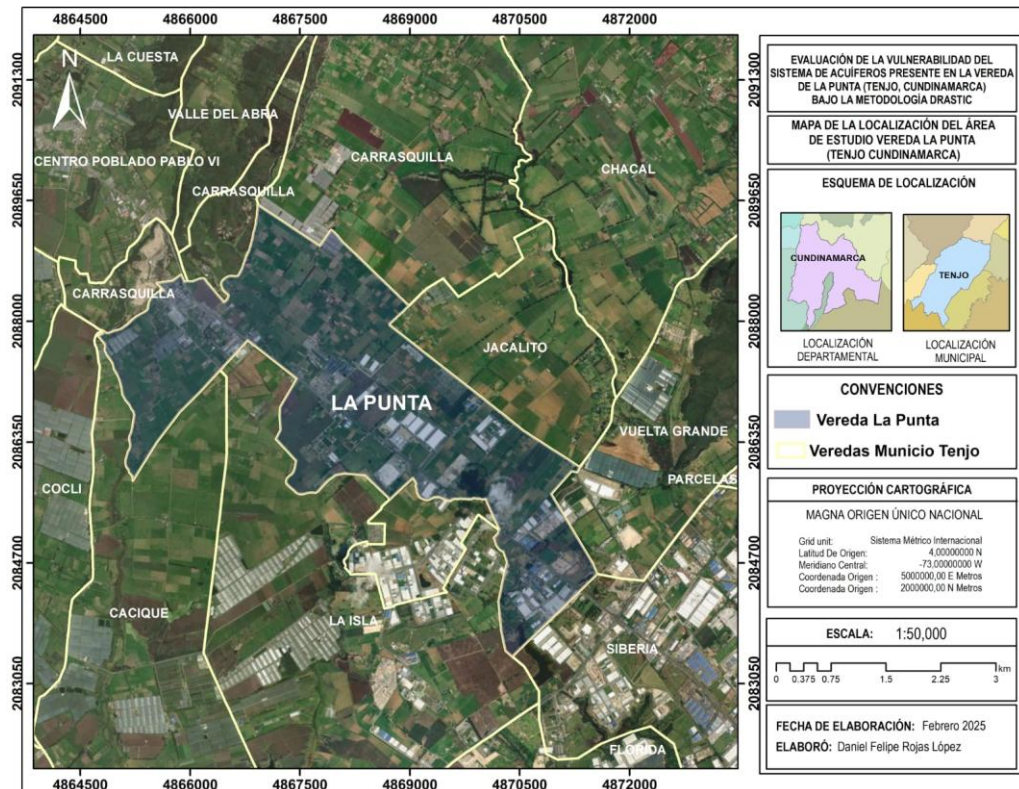
Para el presente estudio se indicó como área representativa la vereda designada como La Punta, la cual se encuentra ubicada en el municipio de Tenjo, Cundinamarca, la cual posee una extensión aproximada medida en el año 2022 de 1,258.56 hectáreas; siendo esta vereda una de las 15 que conforman al municipio en su totalidad (Marín-Benítez et al., 2023)De la cantidad total de

extensión de la vereda ,esta se divide principalmente en tres grandes grupos en los cuales se encuentra 47.1 hectáreas designadas al suelo urbano, seguido de un área aproximadamente igual de 41.25 hectáreas de suelo en características de expansiones urbanas y por último la mayor cantidad en 1,170.21 hectáreas de suelo denominado suburbano, el cual basado en el análisis realizado y aprobado en el plan de ordenamiento territorial emitido y regido por el municipio de Tenjo, se encuentra adaptado y nombrado en su gran mayoría para el sector industrial presente en el municipio además de todas sus fases y subproductos provenientes de este. (Marín Benítez et al., 2018)La vereda está integrada dentro de la extensión rural de Tenjo, el cual a su vez se encuentra referenciado dentro de la zona denominada como la sabana de Cundinamarca, más específicamente en el área central de esta.

El municipio de Tenjo al encontrarse situado a una distancia aproximada de 40 km de Bogotá limita con otra serie de municipios formando parte así de la denominada sabana, entre los cuales se encuentran Tabio, Chía, Funza, Cota, Subachoque y Madrid. (Rendón Acevedo et al., 2023)

La vereda La Punta, ha sido referenciada y analizada en diversos estudios pertenecientes a distintas disciplinas, debido a sus notables características a nivel ambiental, entre las que destacan la abundancia de recursos naturales, especialmente el recurso hídrico subterráneo, así como su extensa zona agrícola; que sumados generan un área ideal y estratégica para la conservación y sostenibilidad ambiental de tanto de la vereda, como también del municipio de Tenjo. (Marín Benítez et al., 2018)

Figura 1. Mapa de la ubicación de la vereda La Punta.



Fuente: Propia – ArcMap 10.8

4.3 Marco Fisiográfico y Geológico

4.3.1 Clima

La zona de estudio en donde se encuentra el municipio de Tenjo se localiza a una altitud aproximada y promedio de 2.570 metros sobre el nivel del mar (msnm). Debido a las características anteriores, en este sector se encuentra un régimen de clima de factor templado-frío, lo cual dispone y genera una relación directa en una de las clasificaciones aplicables en la región Colombia para la sistematización climática como lo es el sistema de Köppen; en donde con base a los diferentes factores y ponderaciones, el sistema presente en Tenjo se encuentra analizado y determinado bajo el término "Cwb"; lo cual se refiere a un clima templado con factores secos en épocas de verano de acuerdo con diferentes micro factores que están ligados a elementos como el régimen y el

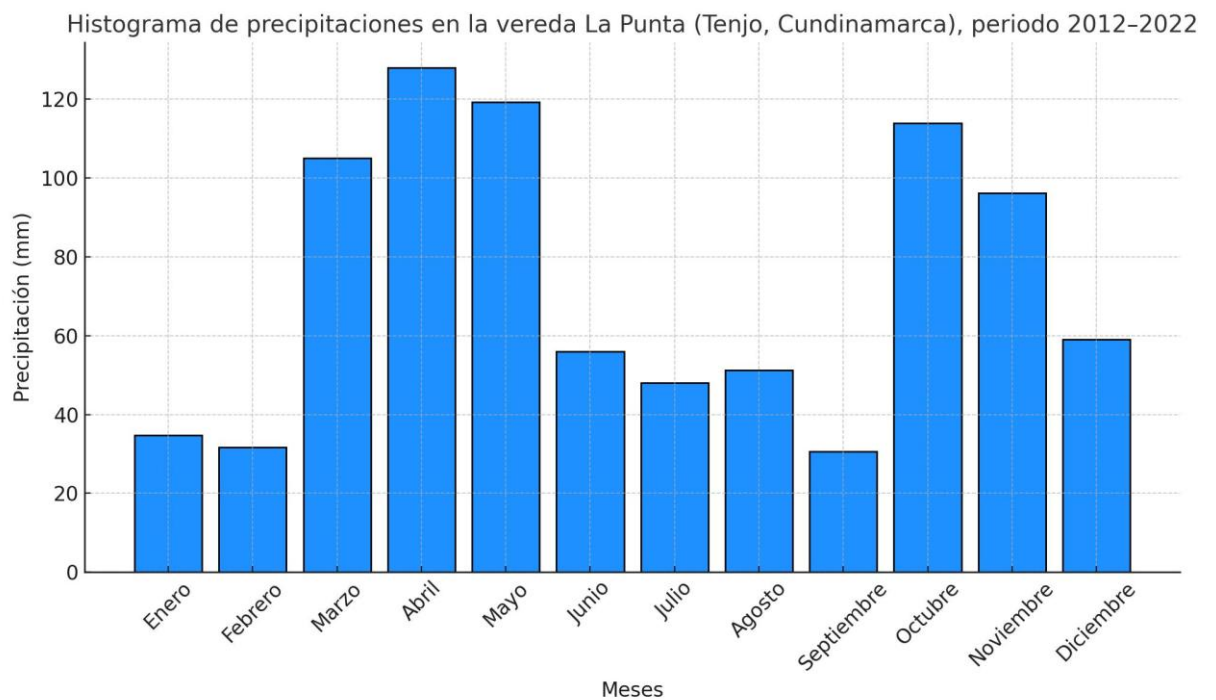
tiempo total durante los años de estudio, tomando como referencia la falta de elementos estacionarios en la región, lo cual determina los regímenes en dos grandes periodos de verano y precipitaciones (Marín-Benítez et al., 2023)

De acuerdo a Melo Martínez et al, (2019) en la región de estudio de Tenjo y sus diferentes veredas se pueden observar y distinguir un patrón desigual en la serie de valores y oscilaciones de temperatura promedio anuales; lo anterior debido a una múltiple cantidad de factores y micro factores que de manera directa o indirecta generan una afectación en esta dinámica como lo son la altitud y la orografía presente en la zona de análisis, por lo que se encuentran valores aproximados entre los 11,5°C y 15,8°C.

Lo anterior, limitando los valores generados en cuanto a máximos y mínimos de temperaturas debido a que estos generan sus cambios basados en la aplicación e interacción con factores constantes y eventos externos aleatorios, generando que al transcurrir los distintos años, estos se vean afectados, pero que en el promedio anual se puedan calcular para así obtener valores estables con los cuales se pueden generar distintos conceptos y medidas; Los valores aproximados para estas fluctuaciones máximas y mínimas están cercanos a los 21°C y 4°C respectivamente.

Las precipitaciones anuales generadas en el municipio de Tenjo, presentan una variabilidad entre los 600 y 900 mm anuales, distribuidos de una manera de característica bimodal, con temporadas de altas precipitaciones entre los distintos meses de marzo y mayo, y entre octubre y noviembre; generando una marcada diferencia entre las temporadas secas, con menores lluvias que se presentan principalmente en los meses de enero, febrero, junio, julio, agosto y septiembre. Los anteriores datos se ilustran en la Grafica 1, en donde por medio de datos obtenidos del IDEAM, se realizó un histograma de precipitaciones para la zona de Tenjo tomando como referencia los datos proporcionados por la estación pluviométrica "EL HATO [21201210]"; en un periodo de referencia de diez años (2012-2022) debido a la suspensión de operación que tuvo la estación antes del año 2011.

Grafica 1. Histograma de precipitaciones por meses en el municipio de Tenjo, Cundinamarca



Fuente: Propia

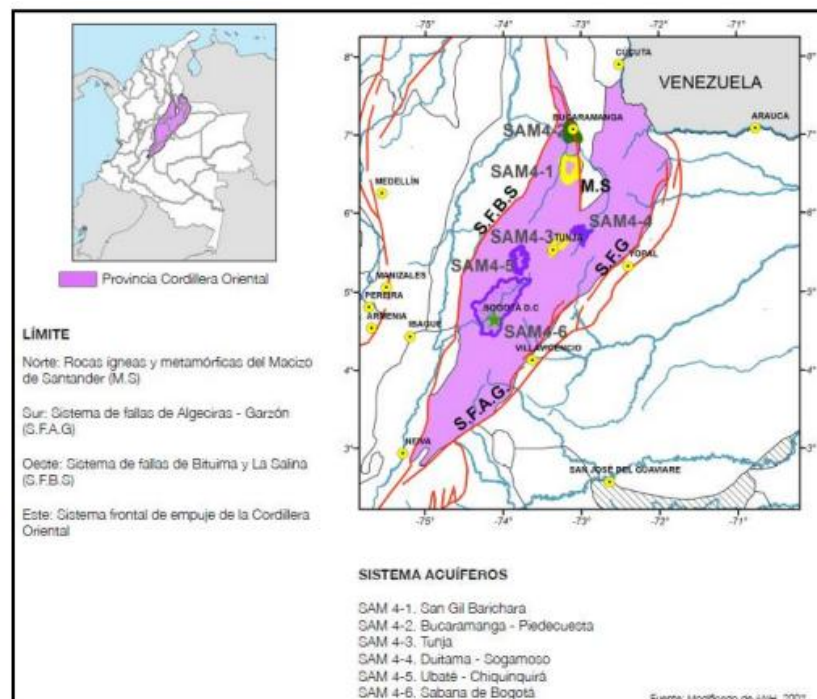
La humedad relativa promedio presente en la vereda de La punta tiene una tendencia considerablemente alta, con promedios cercanos al 75%, lo anterior producido en su mayor parte por la elevada influencia de los distintos ecosistemas de bosque altoandino que rodean la vereda en la zona norte y occidente del municipio de Tenjo. Los vientos provenientes del noreste con intensidades de carácter moderadas y media baja son de aproximadamente entre 12 y 21 km/h, aunque la topografía puede canalizarlos en ciertos sectores, la característica del sector con tendencias llanas y planas de la morfología de la vereda genera un corredor sin muchos obstáculos y alteraciones para estos vientos. (Peña-Beltrán & Pabón-Caicedo, 2020)

4.3.2 Geología e Hidrogeología

En términos geológicos, Tenjo y su respectiva vereda de La punta se encuentra dentro de la Formación Guaduas, que es conocida por sus estratos sedimentarios de origen marino y continental. La presencia de capas sedimentarias, caracterizadas por areniscas y limolitas, define la estructura geológica de la región. Estas formaciones sedimentarias actúan como reservorios y conductos para el agua subterránea, influyendo en la recarga y descarga de los acuíferos locales (Montoya Arenas & Torres Reyes, 2005)

Hidrogeológicamente, la zona de Tenjo exhibe la interacción compleja entre los acuíferos y las formaciones geológicas circundantes. La variabilidad en la permeabilidad de las capas sedimentarias, junto con la presencia de fracturas y fallas, contribuye a la formación de acuíferos con características hidrogeológicas distintivas. La recarga neta, la conductividad hidráulica y la profundidad del nivel freático son factores hidrogeológicos cruciales que influyen en la dinámica del agua subterránea en esta región (Antonio-Fragala & Obregón-Neira, 2011)

Figura 2. Límites de la provincia hidrogeológica de la Cordillera oriental.



Fuente: Vargas et al, 2017.

En la Figura 2 se observa la demarcación de la provincia hidrogeológica en la cordillera oriental mediante el análisis de unidades tectonoestratigráficas, las cuales se corresponden con formaciones geológicas de relevancia. Estas formaciones presentan una composición ígnea que restringe el flujo hídrico debido a su carácter de rocas compactas con capacidad de transporte y almacenamiento de agua.(Betancur-Vargas et al., 2017)

4.4 Marco Legal

Este conjunto de normas proporciona una base sólida y amplia para el marco legal del trabajo de grado realizado con base en el cálculo de la vulnerabilidad bajo la aplicación del modelo DRASTIC, asegurando que todas las actividades relacionadas con el sistema de acuíferos presentes en la vereda La Punta sean monitoreados y resguardados frente a las normativas vigentes y más actualizadas sobre la protección y manejo sostenible de los recursos hídricos en Colombia. La descripción de las normatividades relacionada con el presente documento se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Marco legal del proyecto

NORMATIVA RELACIONADA AL TEMA DEL TRABAJO DE GRADO AÑO	INFORMACION SOBRE LA NORMATIVA	CARACTERIZACION DE LA NORMATIVA SOBRE LOS SISTEMAS DE ACUIFEROS	INFORMACION ADICIONAL
Decreto 2811 de 1974 (Año 1974)	Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y Protección al Medio Ambiente. Gestiona la regulación en torno a los diferentes tipos de uso y a su vez de manejo relacionados de forma directa e indirecta con los recursos hídricos colombianos; basado	Regula y protege la intervención sobre los acuíferos generando una serie de medidas legales con base a la importancia de estos dentro del sistema hídrico nacional. Lo anterior produce una barrera dentro del sistema legal frente a	Gestiono y genero los primeros recursos legales y normativas para la gestión integral y protección de los sistemas hídricos incluidos los subterráneos

	en lo anterior, se creó una serie de subsistemas organizados alrededor de su importancia en los que se ven agrupados los acuíferos, otorgándoles a si una guía de ayudas y protecciones amparadas bajo la ley para estos con el fin de garantizar su protección en la actualidad y en diferentes casos de eventos futuros que puedan ocasionar su deterioro debido a factores de contaminación subterránea y superficial. (Colombia Presidencia de la República, 1974)	actividades y usos que puedan ocasionar una vulnerabilidad del sistema de acuíferos presentes en la vereda de La Punta, Tenjo.	como lo son los acuíferos.
Ley 9 de 1979 (Año 1979)	Ley basada en la realización de actividades de extracción de recurso hídrico para diferentes fines mediante la aplicación de medidas sanitarias con el fin de garantizar la protección y mitigar la contaminación del recurso hídrico subterráneo (Ministerio de Salud y Protección Social, 2022)	Medidas importantes para la mitigación de posibles contaminaciones tanto naturales como antropogénicas que pudieran afectar los sistemas de acuíferos y generar una alteración en los tiempos de recarga y recuperación de estos.	Primeras guías y generalidades sobre la calidad de agua y la importancia de su monitoreo en el recurso subterráneo
Ley 99 de 1993 (Año 1993)	Creación de la entidad más importante en cuanto al medio ambiente como lo es el	Eleva la importancia de realizar diferentes estudios e investigaciones	Instauro las primeras leyes y normativas basadas en

	ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (llamado de esta manera actualmente). Además del establecimiento de un sistema nacional formado por entidades para el monitoreo y ordenamiento territorial ambiental (SINA). Esta ley asigna el poder y autoriza a las corporaciones autónomas regionales la adjudicación y otorgamiento de licencias y concesiones para la explotación del recurso hídrico subterráneo(Ley 99 De 1993, 1993)	con el fin de tener un control actualizado de la calidad y estado de los sistemas de acuíferos, para así proceder a gestiones y planificaciones más acertadas en cuanto al otorgamiento de licencias por parte de la CAR en la vereda de la Punta.	gestión del recurso hídrico bajo premisas y fundamentos ambientales importantes para su protección.
Ley 373 de 1997 (Año 1997)	Crea el sistema basado en el uso optimo y eficiente del recurso hídrico colombiano tanto a nivel superficial como subterráneo, lo cual a su vez autoriza para el uso necesario de estudios hidrogeológicos en proyectos de extracción, esto orientado en la capacidad de generar medidas frente a posibles daños que se pudieran generar a los recursos hídricos subterráneos.(Salazar et al., 2005)	Asigna la importancia de la realización de estudios de alta vulnerabilidad en sistemas de acuíferos, lo cual repercute directamente en las decisiones tanto regionales como locales de los distintos organismos encargados de la gestión optima del recurso hídrico subterráneo en la vereda de la Punta	Aumenta los requerimientos legales para que cualquier persona o entidad que necesite hacer uso del recurso hídrico lo haga de manera responsable y correcta
Decreto 1729 de 2002 (Año 2002)	Origina los diferentes tipos de recurso hídrico con el fin de asignar a cada uno un diferente	Establece zonas de protección para áreas de recarga necesarias en el	Garantiza el mantenimiento y monitoreo de las zonas

	criterio para su evaluación y protección. Establece zonas importantes dentro de estos denominadas como zonas de recarga y descarga con el fin de un monitoreo constante y detallado en estos puntos para garantizar su estabilidad ambiental. (Departamento Administrativo de la Función Pública, 2002)	mantenimiento ecosistémico de los acuíferos y recursos hídricos subterráneos presentes en la vereda La punta	aledañas a los grandes sistemas de acuíferos con el fin de garantizar la protección frente a contaminaciónes indirectas que puedan producirse.
Decreto 1323 de 2007 (Año 2007)	Recopilación de información de datos sobre la gestión ambiental en diferentes zonas del país con el fin de gestionar la creación del sistema de información del recurso hídrico (SIRH)(MONTESINO TORRES et al., 2018)	El sistema de información del recurso hídrico (SIRH) es esencial para monitorear y mantener al corriente tanto a las autoridades ambientales como a las diferentes organizaciones sobre el estado de la calidad del recurso hídrico subterráneo en la vereda de La Punta y en su municipio Tenjo	Planificación y manejo de los recursos hídricos subterráneos.
Decreto 1640 de 2012 (Año 2012)	Instruye y plantea la normativa de carácter obligatorio para los diferentes tipos de actividades que puedan afectar el recurso hídrico subterráneo, aumentando el uso de nuevos estudios por parte de los solicitantes a las concesiones. Aumenta la regulación por parte	Los aspirantes a la obtención de las diferentes concesiones de uso del recurso hídrico subterráneo presente en la vereda de La Punta deberán alinearse ante la reglamentación y documentación exigida por este decreto con el fin de	Obligatoriedad de planes de manejo por cada aspecto en el que se pueda verse afectado el acuífero, el sistema o el recurso hídrico subterráneo en general

	de las autoridades ambientales. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012)	garantizar la protección de los sistemas de acuíferos y reducir así el índice de vulnerabilidad.	
Resolución 0501 de 2014 (Año 2014)	Establece las pautas y procedimientos a seguir para que las autoridades ambientales y corporación autónomas regionales tengan un modelo a seguir para el estudio y entrega de licencias ambientales para la exploración y uso del recurso hídrico con énfasis en acuíferos libres y semiconfinados.	procedimientos necesarios para poder obtener una licencia de aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo, lo cual conlleva a un conjunto de estudios ambientales con el fin de garantizar la estabilidad del acuífero en el área de la vereda de La Punta	Realización de estudios técnicos previos por parte de los solicitantes frente a la autoridad ambiental encargada en el área.
Decreto 1076 de 2015 (Compila y actualiza el Decreto 1541 de 1978) (Año 2015)	Regulación de las concesiones establecidas para el recurso hídrico subterráneo añadiendo requisitos de estudios previos con el fin de garantizar un panorama positivo en las correspondencias ambientales entre los diferentes medios y el sistema de acuífero.(Minambiente , 2020)	Requisitos obligatorios para concesiones de exploración y explotación en el sistema de acuíferos presente en Tenjo y en la vereda de La Punta, con el fin de garantizar la protección de estos.	Aclaración y síntesis de los distintos procedimientos y requisitos para la obtención de licencias y concesiones ambientales en torno a los acuíferos.
Ley 2111 de 2021 (Año 2021)	Transformación y variación de las leyes del código penal en favor de la protección de los acuíferos y distintos cuerpos hídricos subterráneos.	Realizar estudios extensos con el fin de medir y prevenir un posible impacto negativo durante las etapas del uso del recurso hídrico en la vereda La Punta	Refuerza las consecuencias penales por la contaminación de los diferentes tipos de

	(González Forero et al., 2022)		recursos hídricos subterráneos.
--	--------------------------------	--	---------------------------------

Fuente: Propia

5.METODOLOGIA

El presente trabajo se estructuro en torno a tres fases fundamentales, las cuales fueron esenciales para la generación de los resultados utilizados en el desarrollo de la evaluación de vulnerabilidad del sistema de acuíferos del área de estudio en este trabajo de grado ; lo anterior se relaciona bajo un planteamiento de carácter cuantitativo, esto debido a que los datos necesarios para el análisis de vulnerabilidad son de características numéricas, además de una serie de observaciones estadísticas esenciales para generar unas ponderaciones aplicadas en los índices que se representaron en los mapas temáticos de la vulnerabilidad de la zona correspondiente a Tenjo y su vereda La punta.

Además del enfoque cuantitativo que se adoptó en el presente estudio, la metodología se desarrolló bajo un carácter descriptivo, transversal y no experimental; lo primero debido a que se procuró detallar una caracterización básica del sistema de acuíferos presente en la vereda La punta, dando así una descripción lo más cercana posible a la realidad en cómo se encuentra actualmente el sistema frente a la vulnerabilidad provocada por posibles factores antropogénicos y naturales. El carácter transversal y no experimental de la metodología se justificó teniendo en cuenta que los factores que intervienen en el grado de vulnerabilidad que puede poseer un acuífero o un sistema de estos son variados y compuestos por diferentes interacciones y variables, pero que a su vez generan unos resultados que deben ser exactos para poder evaluar el estado actual de estos sistemas, por lo tanto, el enfoque elegido fue fundamental para mantener firmes los valores e índices obtenidos, con el fin de generar una radiografía lo más cercana a la realidad de esta área en términos de la vulnerabilidad intrínseca frente a contaminantes, lo que permitió la elaboración

de los mapas utilizados para expresar los resultados, así como los demás análisis correspondientes.

5.1 Fase N°1

Tabla 2. Fase 1 de la metodología del proyecto

FASE 1	
ACTIVIDAD	Recopilación de datos e información principal
RESULTADOS	Evaluación del sistema de acuíferos y análisis del comportamiento en factores climáticos, hidrogeológicos, hidrológicos, geológicos, estratigráficos y litológicos
INFORMACION REQUERIDA	1.DATOS GEOLOGICOS: Estratigrafía Litología Estructura geológica 2.DATOS HIDROLOGICOS 3.DATOS HIDROGEOLOGICOS 4.DATOS CLIMATICOS
METODO Y/O HERRAMIENTA	1.CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA 2.ALCALDIA DE TENJO 3.IDEAM 4.IGAC

Fuente: Propia

5.2 Fase N°2

Tabla 3 Fase 2 de la metodología del proyecto

FASE 2	
ACTIVIDAD	Análisis de la dinámica basada en los factores contemplados por el modelo D.R.A.S.T.I.C
RESULTADOS	Generación de los mapas correspondientes a cada factor evaluado bajo la aplicación del método DRASTIC (Profundidad del nivel

	freático, Recarga neta, Litología Topografía, Impacto en el acuífero, Conductividad hidráulica)
INFORMACION REQUERIDA	Información recopilada durante la fase número uno (línea base del estudio)
METODO Y/O HERRAMIENTA	1.ArcMap 10.8 2.Excel

Fuente: Propia

5.3 Fase N°3

Tabla 4.Fase 3 de la metodología del proyecto

FASE 3	
ACTIVIDAD	Generación de mapa de vulnerabilidad DRASTIC y zonificación estratégica.
RESULTADOS	Mapa final que clasifica las áreas según su nivel de vulnerabilidad intrínseca basada en los parámetros de la metodología DRASTIC Mapa de la propuesta de zonificación estratégica ambiental para la zona de la vereda de la Punta
INFORMACION REQUERIDA	Mapas generados durante la fase dos de la metodología -POT TENJO
METODO Y/O HERRAMIENTA	ArcMap 10.8

Fuente: Propia

5.4 Descripción de las fases de la metodología

La fase 1, como se describe en la Tabla 2, consistió en el desarrollo metodológico mediante la recopilación de información y datos de factores climáticos, geológicos e hidrogeológicos, fundamentales para entender y expandir el conocimiento de la zona en la cual se planteó el análisis de vulnerabilidad intrínseco del sistema de acuíferos. Esta línea base generó una superficie sólida y clara en donde se estableció la metodología DRASTIC, con el objetivo de tomar

los datos resultantes de diversos estudios e instituciones para reajustarlos a los parámetros establecidos por esta metodología.

Para la obtención de los datos más importantes e insumos fundamentales del estudio como lo son el inventario de pozos del municipio de Tenjo, se solicitó a la corporación autónoma regional (CAR) su listado de concesión de pozos más actualizado, con el que se generó un mapeo de estos en la zona de estudio, ejecutando así una interacción entre estos datos y los suministrados por la alcaldía municipal de Tenjo, entre los que más destaca el plan de ordenamiento territorial(POT); el cual es fundamental para la descripción del uso del suelo y la propuesta de zonificación estratégica ambiental que se planteó al final del proyecto.

Los parámetros de recarga neta del acuífero y profundidad del nivel freático se ajustaron a información y valores suministrados por el instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM), en donde se detalla las formas de escurrimiento y como es la interacción entre el recurso hídrico y las zonas naturalmente dispuestas para la recarga de las múltiples estructuras de agua subterránea, distribuidas por la vereda de la Punta. Se tomo también en cuenta distintos estudios realizados por distintas empresas que poseen diferentes sistemas de pozos en la región, con el fin de corroborar la información proporcionada por las distintas autoridades ambientales y municipales. El manual metodológico para la estimación de recarga de acuíferos en zonas andinas, desarrollado por CONDENSAN en el año 2012, influyo en la generación y reconocimiento de los factores aplicables a el parámetro de recarga neta del acuífero bajo la metodología DRASTIC. Este estudio se relacionó su vez con los distintos datos obtenidos del balance hídrico realizado por Hernández en año 2015, en donde evaluó la recarga natural de los acuíferos presentes en la región central de Colombia, bajo el uso de métodos simples de balance hídrico.

Sumado a lo anterior para los demás parámetros se hizo uso de múltiples fuentes de información debido a las características requeridas a detalle del subsuelo del municipio de Tenjo y de su vereda de estudio; por lo tanto, estos datos se recopilaron de instituciones como el servicio geológico nacional, el instituto

geográfico Agustín Codazzi y entidades privadas que tienen múltiples estudios ambientales e hidrogeológicos en la región de Cundinamarca y la altiplanicie de la sabana; aparte de la formación Guadalupe, en donde se encuentra los acuíferos estudiados en el presente estudio. Los datos generados para los parámetros de litología del acuífero y naturaleza de la zona no saturada se basaron en información proporcionada por la red colombiana de monitoreo de aguas subterráneas del año 2017; que junto a los mapas de suelo del IGAC, generaron la ponderación de los valores estimados más compatibles con la región de estudio ubicada en la vereda la Punta.

Para la caracterización de la topografía y las pendientes en porcentajes presentes en la vereda de La Punta en Tenjo, Cundinamarca, se utilizó un modelo digital de elevación (DEM) proporcionado por la alcaldía de Tenjo con el fin de realizar la comparación frente a los modelos digitales ofrecidos por los portales SRTM de la administración nacional de aeronáutica y espacio (NASA). Una vez adquirido los DEMs, se realizó la proyección con las coordenadas para su posterior recorte tomando como base la vereda de La Punta en el software de ArcMap 10.8.

Teniendo en cuenta la tabla 3 referente a la fase dos de la metodología, se determinó los parámetros requeridos y utilizados bajo la metodología DRASTIC, además de lo anterior, se procedió a la estimación de estos mediante el uso de una serie de informaciones de diversas fuentes y estudios hidrogeológicos realizados en diferentes años con el fin de generar una caracterización más definida y cercana al funcionamiento real del sistema de acuíferos presente en la vereda de la Punta, en el municipio colombiano de Tenjo. Además de la información recopilada se aplicó el uso de bases de datos tanto nacional como internacionales con el fin de corroborar y comparar información con el fin de que los datos reflejados en los mapas resultantes de las diferentes variables medidas tuvieran una consistencia lógica con la situación actual del área de estudio del presente trabajo.

Los parámetros establecidos por la metodología DRASTIC fueron inspeccionados y calificados mediante la utilización de una subclasificación de

ponderaciones y puntuaciones determinadas en valores desde el 1 y el 10 en la mayoría de los parámetros; lo anterior con el fin de representar los niveles de vulnerabilidad tanto mínimos como máximos respectivamente. Estos parámetros a su vez también se tomaron bajo la consideración de su posible influencia en las dinámicas existentes en los acuíferos y como está podría afectar el curso normal de estas y de sus diferentes variables y factores. (Barbulescu, 2020)

La ponderación de los siete parámetros clave del estudio (profundidad del nivel freático, recarga neta, litología del acuífero, tipo de suelo, topografía, naturaleza de la zona no saturada y conductividad hidráulica) se realizó mediante el uso de las tablas aplicadas por la agencia de protección ambiental de los estados unidos (EPA), con el fin de la jerarquización de estos enfocados en la importancia tanto individual como colectiva que puede interferir en las interacciones naturales de los recursos hídricos subterráneos, siendo específicamente en este caso el de los acuíferos. Para lo anterior se tomó en cuenta las tablas otorgadas por el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible del año 2018, en donde expresan la valoración para cada uno de los parámetros ejercidos por la metodología DRASTIC.

Una vez obtenido los valores de ponderación y valoración de los parámetros, se procedió a la aplicación de la ecuación contenida en la tabla general del índice de vulnerabilidad, en donde por medio de la información proporcionada por EPA (1990), que se observa en la tabla 5, se aplicó la generación de algebra de mapas en el software ArcMap 10.8, con el fin de obtener los mapas resultantes de la tercera fase de la metodología presente.

Tabla 5 tabla general del índice de vulnerabilidad DRASTIC

Parámetro	Símbolo	Valoración (r)	Ponderación (w)	Producto (r × w)
Profundidad al nivel freático	Dr	Dr	Dw	Dr × Dw
Recarga neta del acuífero	Rr	Rr	Rw	Rr × Rw

Material del acuífero	Ar	Ar	Aw	$Ar \times Aw$
Conductividad hidráulica	Sr	Sr	Sw	$Sr \times Sw$
Topografía	Tr	Tr	Tw	$Tr \times Tw$
Zona vadosa	Ir	Ir	Iw	$Ir \times Iw$
Uso del suelo	Cr	Cr	Cw	$Cr \times Cw$

Fuente: EPA, 1990

Debido a la dinámica social e industrial presente en la región de Tenjo y en su vereda de la Punta, con el fin de plasmar posibles contaminantes que puedan estar siendo utilizados actualmente en el área de estudio, se optó por la asignación de valores de características máximas en el resultado de su ponderación, con el fin de que los resultados expuestos en los mapas temáticos consideren estos factores altamente peligrosos para los estímulos entre acuíferos del mismo sistema.

Una vez realizado las dos primeras fases dispuestas en la metodología del presente documento, se procede de acuerdo con la Tabla 4, a la realización de la última fase en donde por medio de los resultados obtenidos después de la sobre posición de los mapas temáticos de las variables proporcionadas por el método DRASTIC en el software ArcMap, se interpretaron los resultados de las distintas capas ráster dictadas bajo un conjunto de operadores, para obtener el mapa final del índice de vulnerabilidad intrínseca frente a contaminantes del sistema de acuíferos presentes en la vereda de la punta, en el municipio de Tenjo.

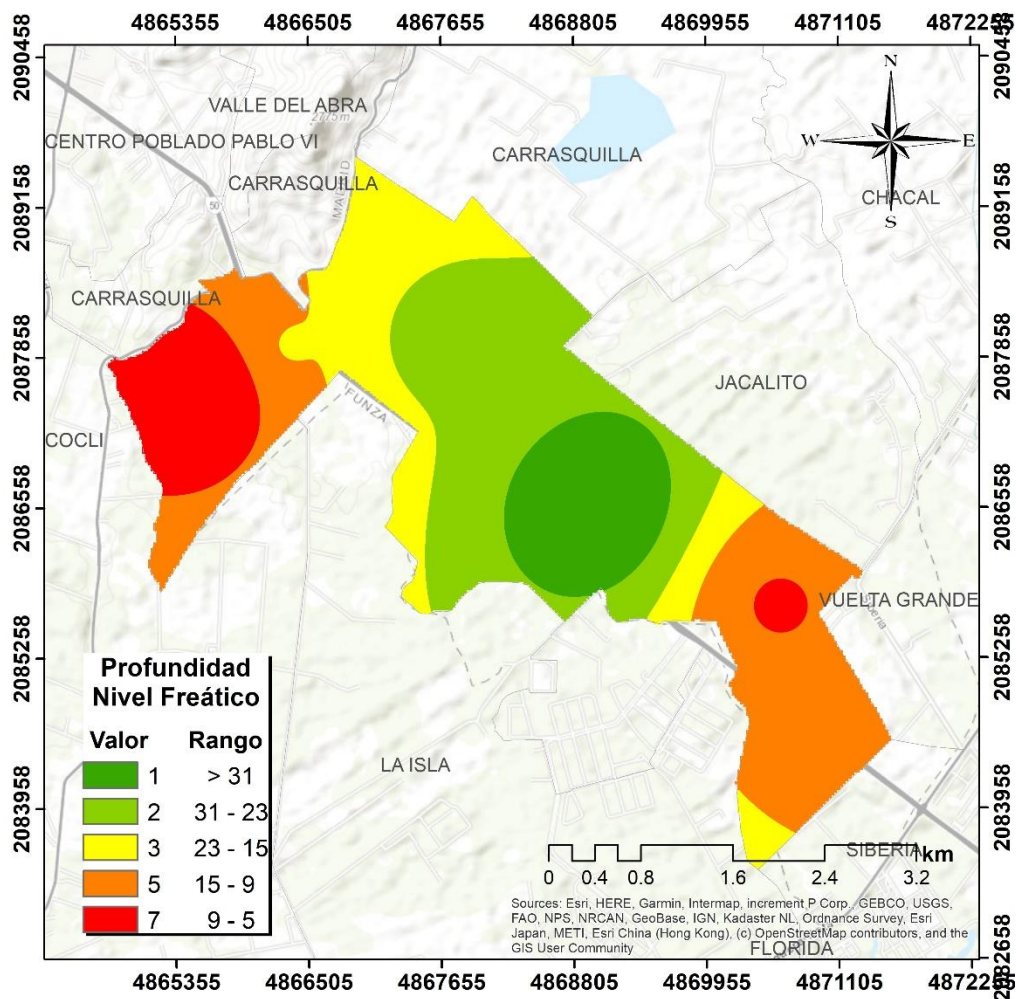
El mapa final del producto de la aplicación de la metodología DRASTIC se vinculó junto a los datos y diferentes fuentes de información referentes al uso de suelo; también se utilizó el plan de ordenamiento territorial (POT), para así realizar una propuesta de zonificación ambiental entorno a la vereda de la Punta, teniendo en cuenta los diferentes tipos de usos de suelo que se presentan en la

zona; esto se hizo con el fin de generar una asociación de factores finales con el que se desarrolló un mapa en el software ArcMap, en donde se delimito los posibles nuevos usos del suelo que podrían ser tenidos en cuenta por distintas entidades ambientales además de la alcaldía de Tenjo, con el fin de minimizar el índice de vulnerabilidad que se obtuvo en el presente trabajo en el área de estudio.

6. ANALISIS DE RESULTADOS

6.1. Profundidad del nivel freático

Figura 3. Mapa del parámetro de profundidad del nivel freático, vereda la Punta.



Fuente: Propia - ArcMap 10.8

En el mapa de la Figura 3 se encontró que, para el valor de 7, se ubicaron un total de 2 zonas de rangos entre los 5 a 9 metros de profundidad, que en sumatoria de áreas suponen un 12.4% del área total de la vereda de la Punta. La profundidad de este primer rango sugiere que estas áreas son enormemente más propensas a sufrir altos nivel de contaminación por parte de diferentes

contaminantes que pueden ser transportados desde el suelo y llevados hasta el nivel freático; siendo así posiblemente movilizados hacia la ubicación de distintos tipos de acuíferos de características libres y semiconfinadas. Lo anterior eleva el riesgo de vulnerabilidad de tales zonas, lo cual se identifica que entre mayor nivel de vulnerabilidad se posee una menor distancia entre la superficie y el nivel freático (Garzón, 2011).

Tanto para el rango entre 5 a 9 m y 9 a 15 metros se evidencio con base en los análisis y datos suministrados por el ordenamiento territorial del municipio de Tenjo del año 2023 que la agricultura y las actividades agropecuarias intensivas son las que mayor predominan en la zona, debido a sus características de morfología plana del suelo, que son un factor importante e ideal para estas actividades.

Para los rangos de 9 a 15 metros y 15 a 23 metros se tuvo unas áreas aproximadas dentro del mapa de 20.6 % y 24% sobre el área total de la vereda La punta la cual equivale a aproximadamente a 1548 hectáreas .En su mayoría estas zonas comprenden residencias de carácter rural, cultivos, invernaderos y viveros; además de que en los últimos años se han incrementado el número de propiedades compradas con el fin de establecer comercios y microempresas con diferentes procesos productivos debido a su cercanía a la capital Bogotá y sumado a esto el precio bajo en arrendamientos frente a precios establecidos en la capital del país vuelven a la vereda un punto estratégico llamativo; lo anterior genera el aumento exponencial de la ocupación y expansión de la zona a nivel industrial y residencial produciendo un aumento de la vulnerabilidad de los acuíferos presentes frente a posibles fuentes de contaminación antropogénicas y naturales.

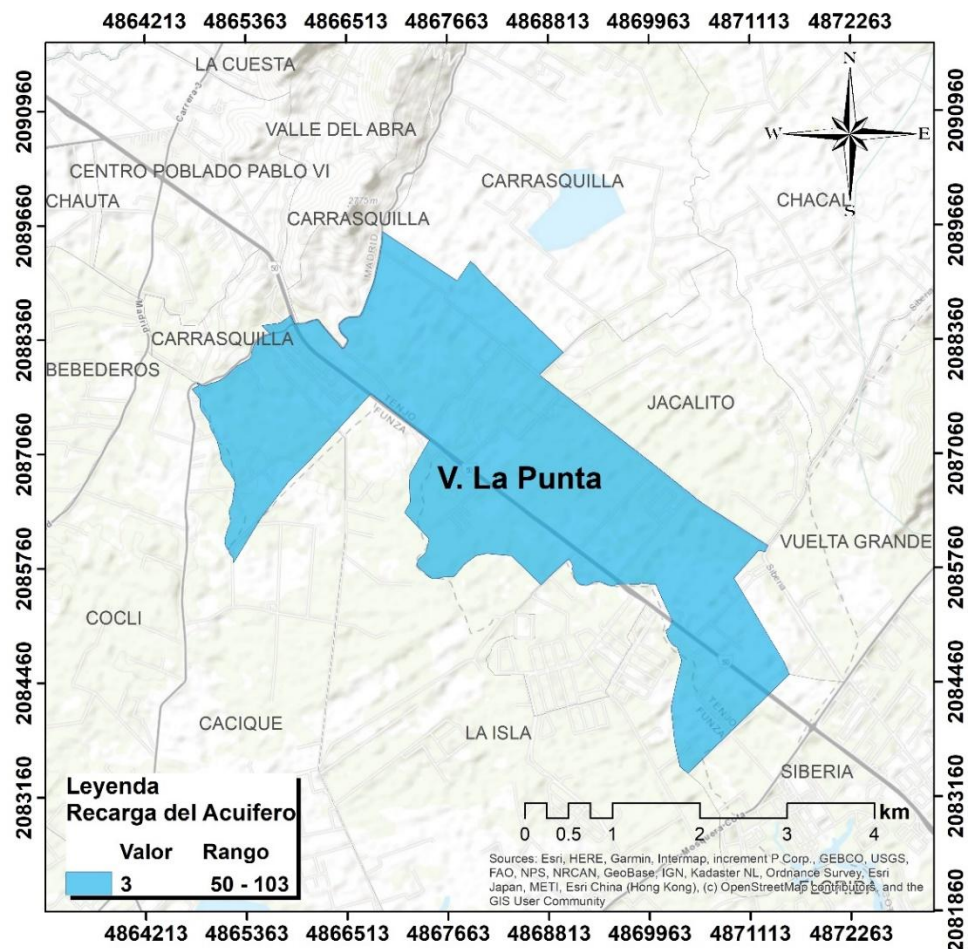
Para las últimas dos ponderaciones de 1 y 2, se evidencia una serie de rangos por encima de 23 metros de profundidad del nivel freático, esto quiere decir que la distancia entre la superficie y la lámina superior del nivel freático es mucho más amplia permitiendo que el medio de características poco o no saturadas realice una ralentización de los posibles contaminantes que pudieran afectar el recurso hídrico subterráneo, generando así una mayor capa de seguridad frente

a estos. El porcentaje total de ocupación de estas dos ponderaciones frente al área total es de aproximadamente el 43,5 %, siendo zonas ocupadas en su mayoría por invernadero floral y un pequeño porcentaje de ganadería extensiva; reflejándose estas tendencias en la zona central de la vereda.

6.2 Recarga neta

La recarga neta es el segundo parámetro que requiere la metodología DRASTIC para realizar un diagnóstico de la vulnerabilidad presente en un sistema hídrico subterráneo, siendo el caso de un sistema comprendido entre acuíferos de características libres y semiconfinadas para la región comprendida en la vereda de La Punta. La recarga ocurrida en la zona de estudio se identificó mediante el uso de información proporcionada por estudios previos en la región de Tenjo, que combinados con la identificación de la zona de flujo superficial se obtuvo los valores de recarga para la zona plana de Tenjo, que no es más que aproximadamente uniforme para toda la vereda de la Punta, debido a que su planicie genera una homogeneidad aproximada en todo el valor de recarga que está los intervalos entre los cincuenta y los ciento tres milímetros como se observa en la figura 4.

Figura 4. Mapa del parámetro de recarga neta, vereda la Punta.



Fuente: Propia- ArcMap 10.8

Debido a la formación de planicie que posee la vereda en su mayoría de superficie, genera que la recarga del acuífero no tenga fluctuaciones significativas, esto bajo el modelo de una variabilidad temporal normal sin alteraciones fomentadas por algún factor externo no habitual; que a su vez pueda generar cambios en la dinámica vertical habitual de acuerdo a los rangos de recarga. De acuerdo con Gómez (2017), estos rangos de recarga situados entre los 50 y los 103 mm, se contemplan para zonas en las que la topografía disminuye la formación de mecanismos de infiltración de alta actividad.

La composición que posee basada en arcillas que ocasionan entornos de mínima capacidad de penetrabilidad por parte de sustancias y flujos hídricos, que paulatinamente produce un descenso en la capacidad de recarga del acuífero al no tener un ingreso amplio y constante de agua que pueda ocuparlo ante

disminuciones y alteraciones por causas naturales y/o antropogénicas. Estos depósitos de arcillas manejan rangos de permeabilidad bajos debido a su rango general de conductividad hidráulica, el cual se encuentra en promedios de aproximadamente 1×10^{-7} m/s, lo que altera la capacidad del recurso hídrico para percolarse en dirección a la estructura interna del acuífero.

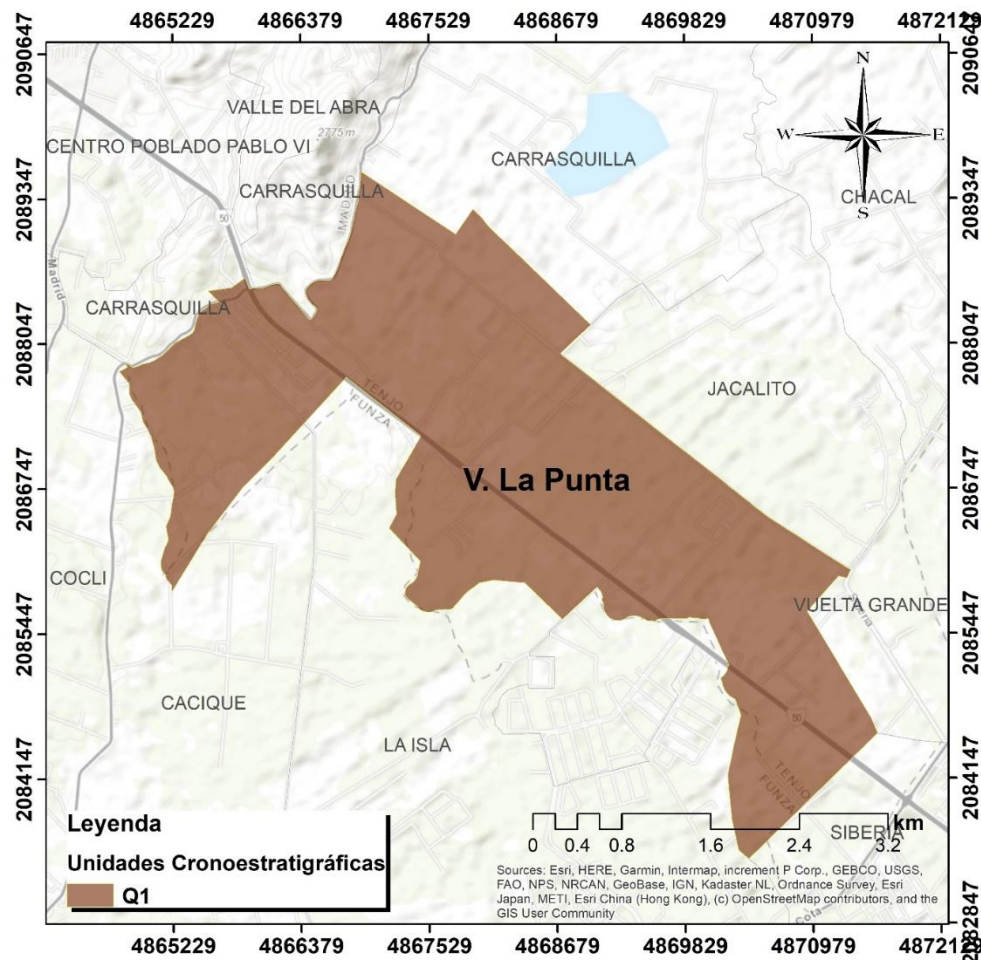
La combinación de distintos factores topográficos y litológicos, generan que la recarga adaptada a los sistemas de acuíferos del presente estudio se vea disminuida y de manera categórica ralentizada, lo cual bajo eventos de extracción hídrica por medio de pozos con el fin de satisfacer una actividad antropogénica pueda verse afectado en un porcentaje por encima del 45% por encima de sistemas de acuíferos con recarga neta eficiente. De acuerdo con CAR (2016), la disminución de los niveles piezométricos promedios en la región de Cundinamarca y la sabana de Bogotá sucede a un ritmo de entre 15 y 28 cm en periodos de tiempos anuales, tomados por un lapso de 5 años, lo cual ocasiona que aumente la distancia vertical del recorrido del recurso, que a su vez genera el aumento de tiempo de recarga para estos acuíferos.

6.3 Litología del acuífero

El tercer parámetro utilizado por DRASTIC es la litología presente en el acuífero, lo cual significa una descripción detallada de la composición y materiales presentes en la unidad hidrogeológica del presente estudio. Estas rocas y sedimentos influyen de manera altamente perceptible en la suficiencia que posee el conjunto de acuíferos para permitir y autorizar el transporte de contaminantes dentro de los mismos materiales que lo conforman. Con base a lo anterior, en la Figura 5 se observa como la vereda de Tenjo está ubicada en una unidad cronoestratigráfica basada en arcillas de propiedades arenosas y con rastros mínimos de presencias de gravas. Para Tenjo y más específicamente las veredas ubicadas al sur de este municipio, el servicio geológico colombiano realizó un estudio detallado en donde se muestra como la unidad prácticamente predominante en la vereda la punta corresponde a la escala “Q1”, siendo esto

corroborado frente al nivel de recarga que posee el sector, el cual es ínfimamente bajo respecto al área total de Tenjo.

Figura 5. Mapa de la unidad cronoestratigráfica, vereda la Punta.



Fuente: Propia - ArcMap 10.8

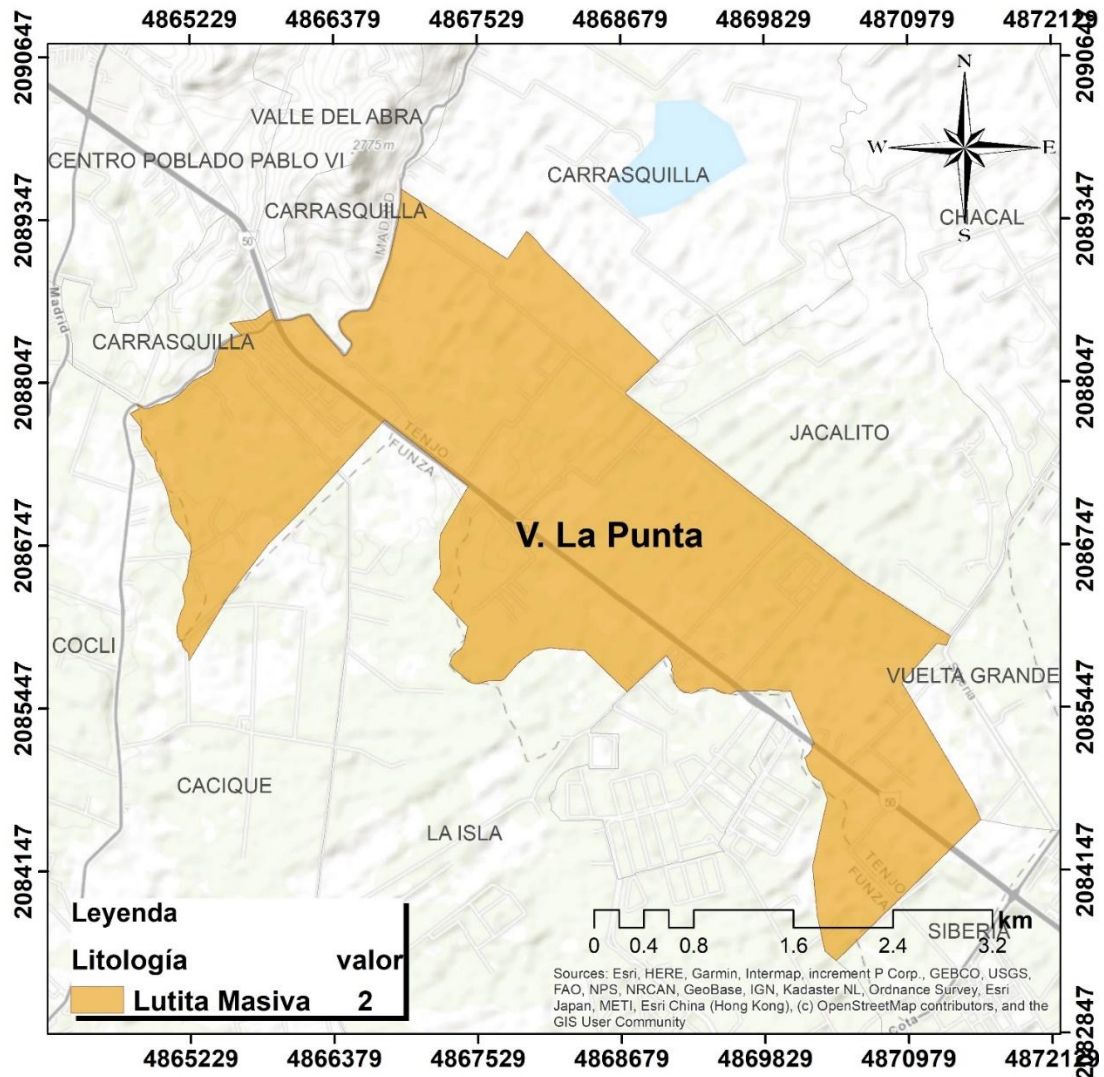
Una vez obtenida la unidad cronoestratigráfica de la vereda de la Punta, se procedió a realizar la caracterización de los tipos de rocas presentes en la formación correspondiente a la zona de La Punta, mediante los datos arrojados por los estudios previos y la metodología DRASTIC; en donde se indagó sobre la características sedimentarias del cretácico superior, generalmente identificadas para la formación Guadalupe, en donde la presencia de zonas que

albergan módulos de arenas son bajas y no representan un factor de mayoría dentro de geomorfología del subsuelo.

La litología encontrada se relacionó frente a las características de los demás parámetros dando así un resultado de que, en relación de la alta presencia de arcillas, la litología presente se caracteriza por ser una lutita compacta, denominada mayormente como lutita masiva sedimentaria; con propiedades altamente finas y de gran retención de partículas de diferentes compuestos y agua. La porosidad presente en este tipo de material ronda los promedios inferiores al 10%, lo cual ocasiona que el componente de conductividad hidráulica atada a esta formación también presente valores mínimos, en donde se observan rangos aproximados de 10^{-8} a 10^{-7} m/s (Mc Laughlin & Arce H., 1971).

Sumado a lo anterior, la presencia de filosilicatos con base a la estructura mineralógica general de la formación Guadalupe produce una posible absorción más prolongada y rápida de diferentes sustancias que pueden afectar mínimamente los ciclos y componentes de los acuíferos presentes, esto debido a la permanencia elevada de estos elementos en las estructuras anteriormente mencionadas. Debido a esto, como se observa en la Figura 6, la ponderación entregada para este tipo de formación corresponde a un grado 2, lo cual indica que la vulnerabilidad intrínseca del acuífero en cuanto a la variable de litología sea moderadamente baja.

Figura 6. Mapa del parámetro de litología del acuífero, vereda la Punta.



Fuente: Propia - ArcMap 10.8

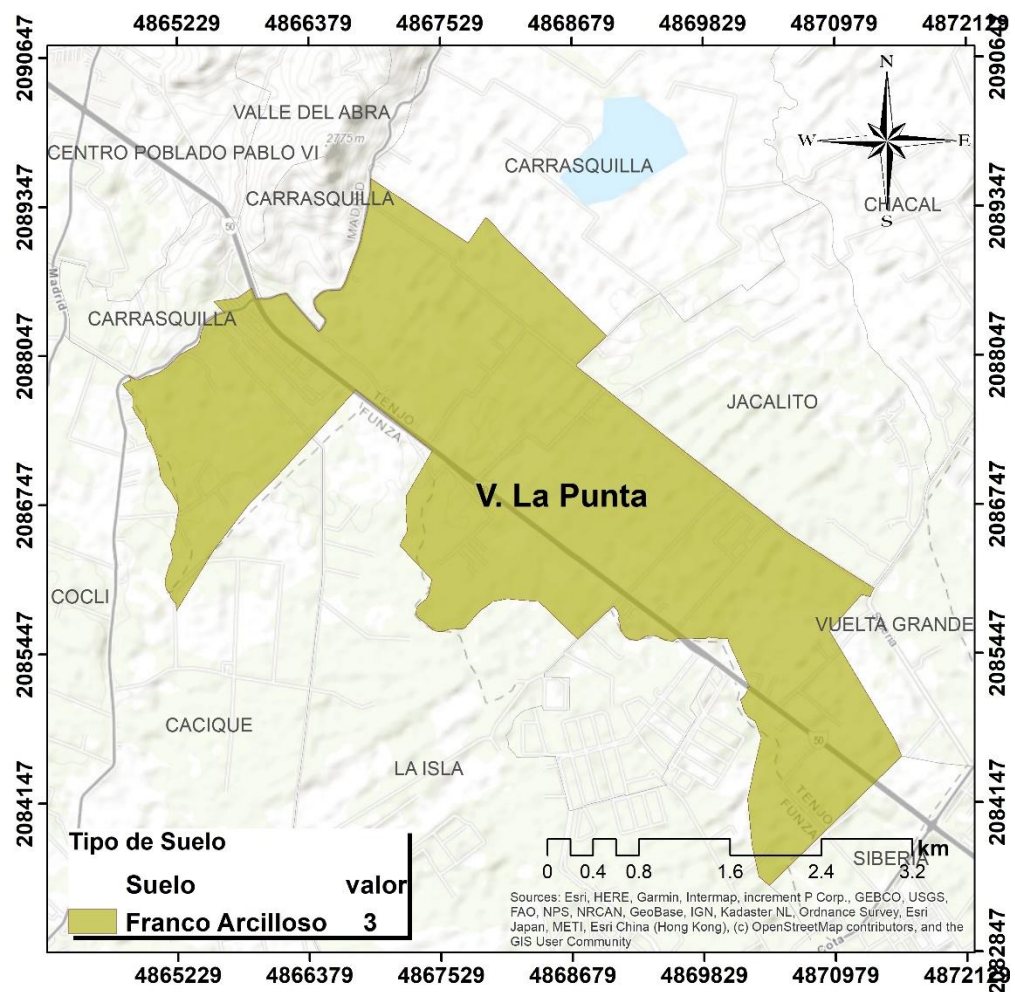
6.4 Tipo de suelo

Tomando en cuenta la información suministrada por la alcaldía del municipio de Tenjo y el repositorio de planchas disponibles en el IGAC (instituto geográfico Agustín Codazzi), se encontraron datos correspondientes a la cartografía edafológica de los suelos de la vereda de la Punta; las cuales muestran caracterizaciones altamente favorables para múltiples contextos y actividades entre las que se encuentran la agricultura y la siembra de flores. Lo anterior se

debe a los componentes y porcentajes altamente estables que se encuentran en su suelo como lo son las arcillas en porcentajes que varían entre los 27% y 45 %, ocasionando que las propiedades del suelo se vean afectadas de manera favorable en cuanto a la posibilidad de capacidad de retención hídrica, acumulación y reserva de sustancias esenciales para el crecimiento en plantas y cultivos; como el fosforo, el nitrógeno y el potasio entre otros (Jacqueline Arroyo, 2016).

En la Figura 7 se puede observar la ponderación otorgada para los materiales franco-arcillosos presentes en la totalidad de la zona de la Punta siendo el valor de 3 de acuerdo a los factores ofrecidos por la herramienta metodológica para el cálculo del índice de vulnerabilidad, DRASTIC.

Figura 7. Mapa del parámetro de tipo de suelo, vereda la Punta.

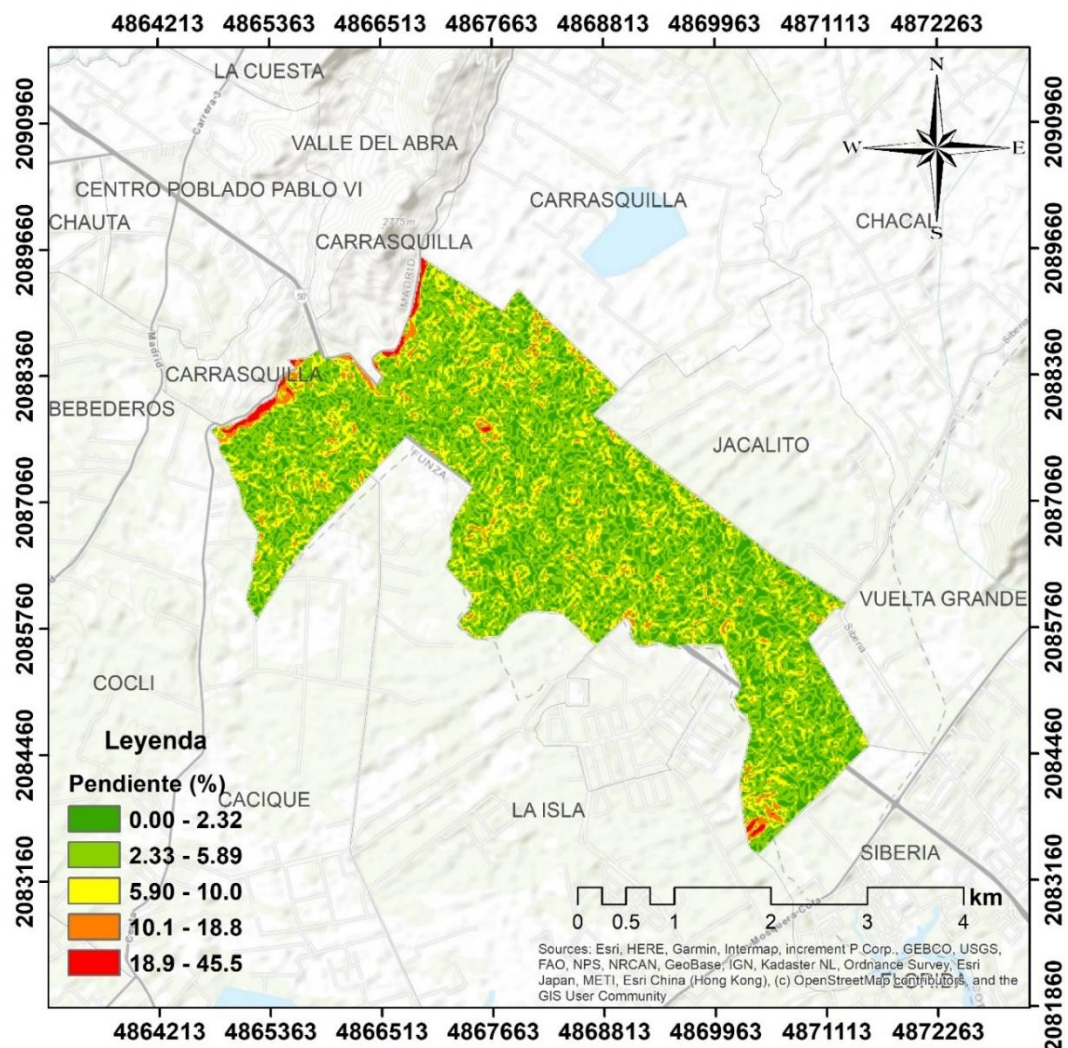


Fuente: Propia - ArcMap 10.8

6.5. Topografía

En la Figura 8, se observa el mapa obtenido con los porcentajes de las pendientes presentes en el área del presente estudio; las características planas de la vereda se pueden visualizar al analizar su área frente al total del estudio dando un aproximado del 89.5%, en el rango entre 0 % y 10%. Lo anterior confiere un paisaje mayoritariamente de planicie para la zona a excepción de unos pequeños accidentes orográficos ubicados en la parte suroccidental de la vereda con pendientes de hasta un 7%.

Figura 8 Mapa de las pendientes topográficas de la vereda la Punta.

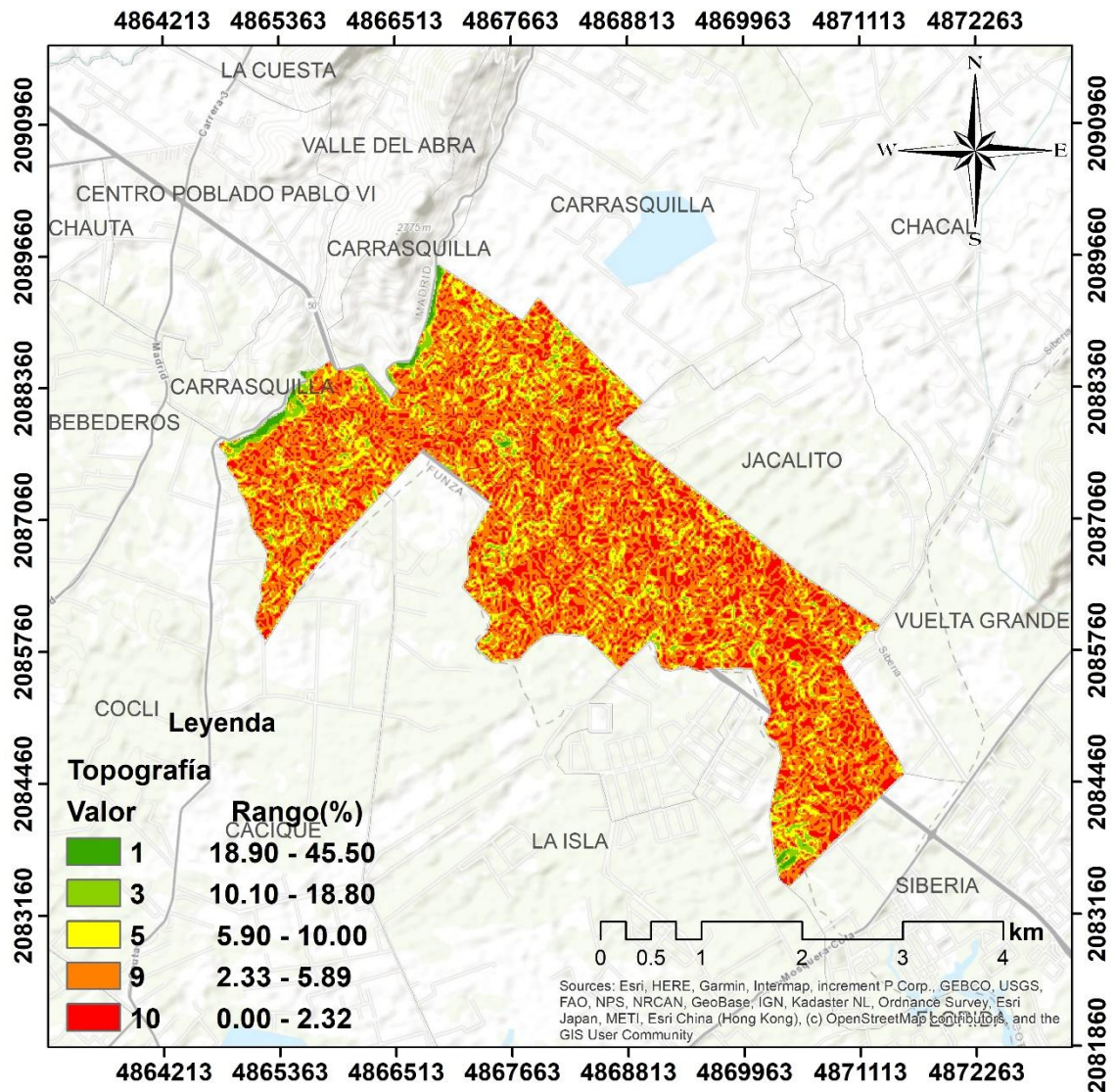


Fuente: Propia - ArcMap 10.8

Una vez obtenidos los rangos de valores para las pendientes existentes en la vereda de La punta, se procedió por medio de los factores de ponderación otorgados por DRASTIC a realizar el mapa de vulnerabilidad para el parámetro topográfico como se observa en la Figura 9. El parámetro de topografía es esencial en el análisis del sistema de acuíferos presentes en la vereda de La Punta, lo anterior debido a la relación directa entre los factores de velocidad y dirección de flujo con las pendientes de la morfología de la zona, lo que genera un posible aumento en la capacidad de infiltración de diferentes tipos de contaminantes hacia el recurso hídrico subterráneo (Karlin et al., 2019).

Para los valores obtenidos se observó que la morfología dominante en su gran mayoría es de características de planicie lo cual genera que la vulnerabilidad aumente a una puntuación de diez. La clasificación se debe a múltiples factores que benefician el tiempo de los contaminantes en el suelo, lo cual permite un mayor tiempo de residencia para una posible infiltración en el recurso hídrico subterráneo. Caso contrario de los rangos con mayor pendiente, siendo estos menos propensos a la contaminación vertical y a su vez ofreciendo un mayor grado de limitación hacia el tiempo de permanencia de los contaminantes (Ruiz Molina & Muñoz Perea, 2023).

Figura 9. Mapa del parámetro de topografía, vereda la Punta.



Fuente: Propia - ArcMap 10.8

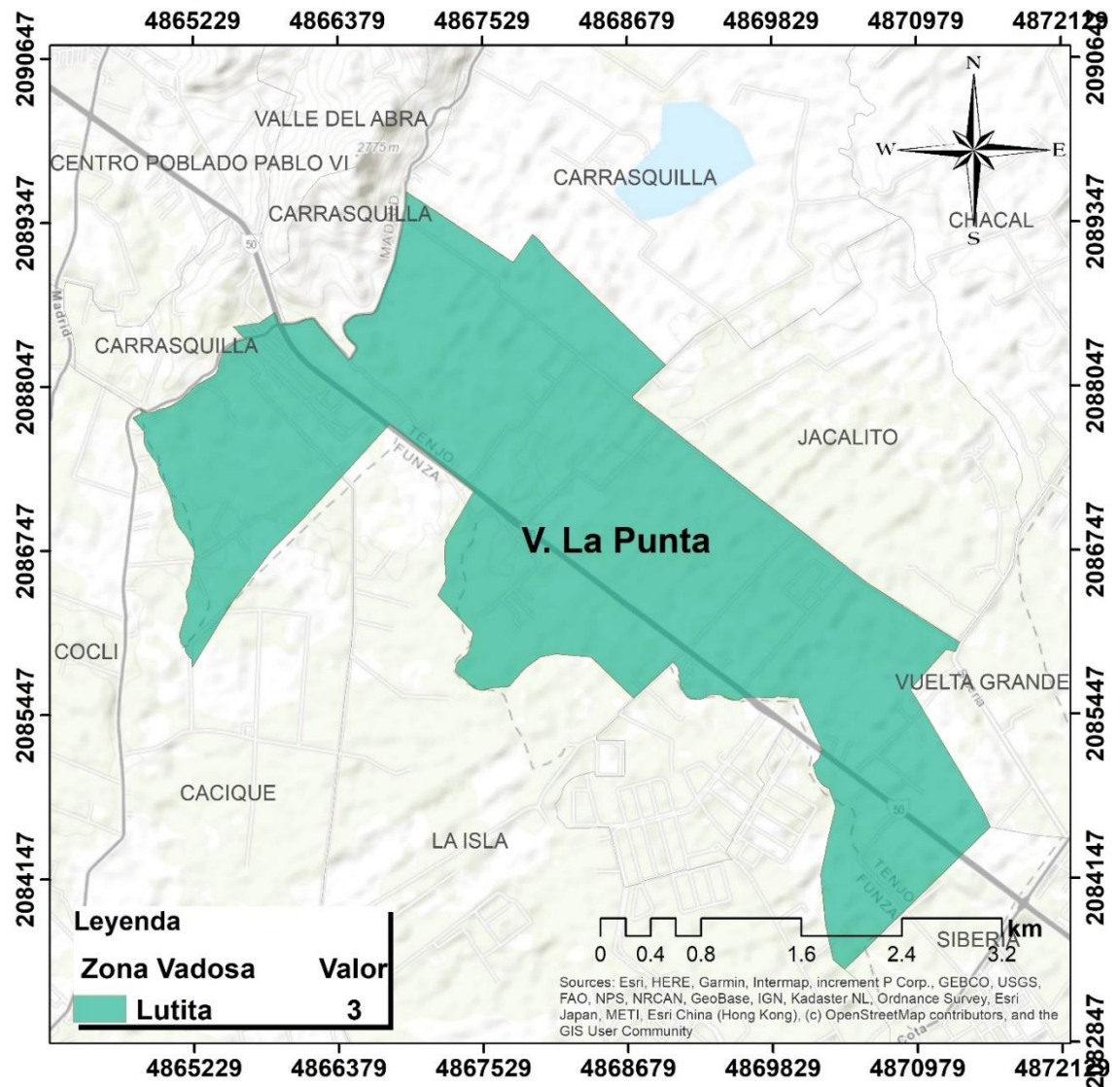
6.6 Naturaleza de la zona no saturada.

Las características conformadas por las diferentes capas litológicas se analizaron a partir de informes y mapas otorgados por el servicio geológico colombiano, en donde se evidencia para la zona de estudio del presente trabajo que las unidades estratigráficas correspondientes a la zona no saturada están compuestas en su gran mayoría de rocas finas con capacidad de fragmentarse

y dividirse; lo anterior hace referencia a la presencia de lutitas en los rangos analizados de subsuelo seleccionados, otorgando así cualidades de baja permeabilidad debido a las arcillas presentes, lo cual se traduce en una reducción del movimiento de manera vertical del recurso hídrico, así como de contaminantes y sustancias que pudieran estar en contacto con este. Las demás capas analizadas a mayor profundidad dieron indicios de poseer en su formación litológica bases de limos en combinación con las arcillas de las capas superiores, generando así un aumento del índice de permeabilidad que posee la estructura externa del acuífero, en este caso el sistema de acuíferos presente en la región geológica denominada Guadalupe (Julivert, 1962).

La sumatoria de estas capas confieren al subsuelo una heterogeneidad única y especial que crea una dinámica y una interacción más elevada entre el movimiento y transporte del flujo hídrico en el medio poroso y la capacidad hidráulica de la zona no saturada; por lo tanto, se le confiere una ponderación de 3 sobre la escala total de vulnerabilidad entregada por la formula aplicada por DRASTIC y el software ArcMap.

Figura 10. Mapa del parámetro de la naturaleza de la zona no saturada, vereda la Punta.



Fuente: Propia - ArcMap 10.8

6.7 Conductividad hidráulica.

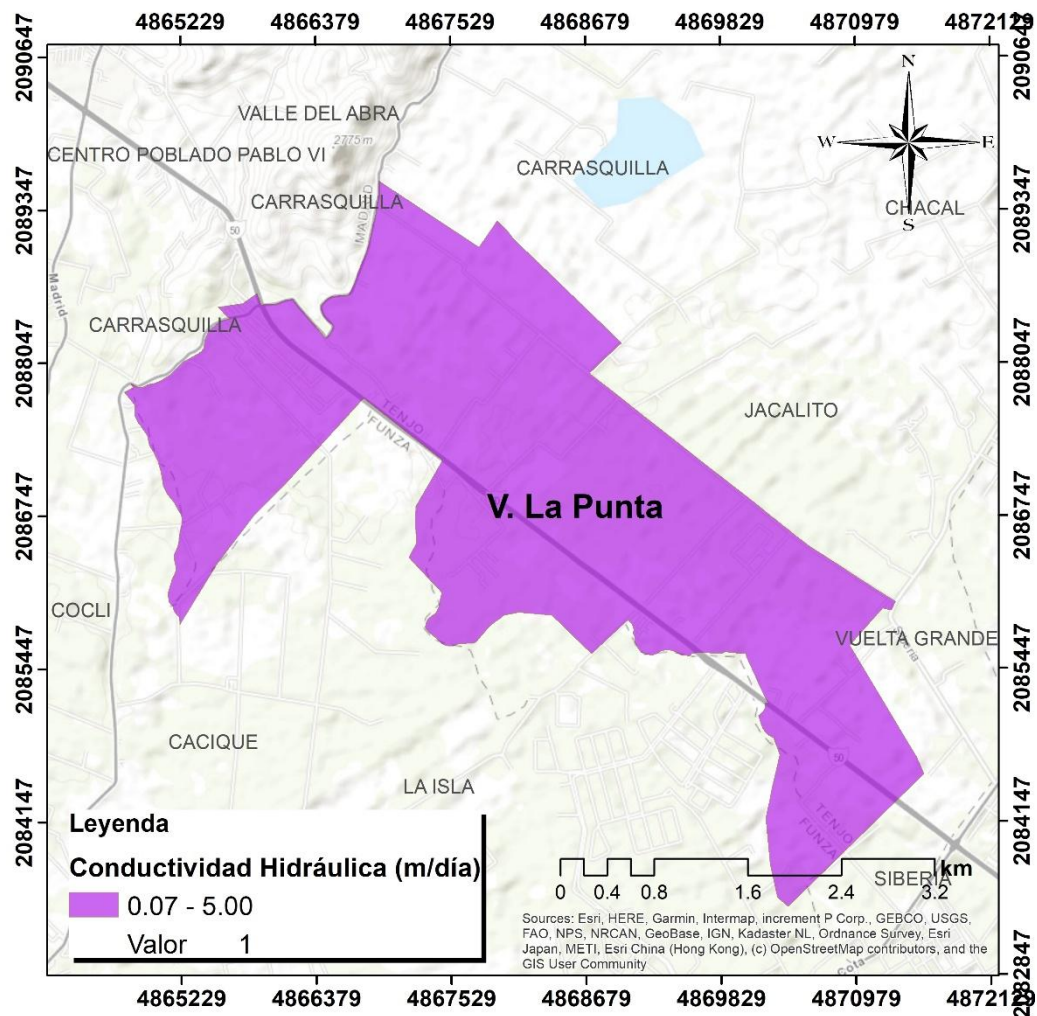
El parámetro de conductividad hidráulica fue constante para toda la vereda de la Punta, además de que, según estudios previos presentados en el municipio, se encontró que este mismo rango de conductividad es homogéneo para toda la región de Tenjo debido a la composición de la litología y el subsuelo, que genera

la proliferación de estructuras que albergan múltiples acuíferos de carácter semiconfinado. Tomando en cuenta lo anterior, la calidad de estos acuíferos genera factores menores de conductividad hidráulica del recurso hídrico en ordenes de los 5 m/día o valores inferiores (Vidal-Méndez, 2008).

Según Ujueta Lozano(1961), los municipios ubicados en la formación Guadalupe poseen valores de conductividad media debida a las características de los materiales que conforman esta formación como lo son los franco-arcillosos y arenosos, lo cual genera estos valores mostrados en la figura 11, donde se expresa en rangos entre los 1 m/día y los 5m/día. Estos mismos valores fueron constatados frente a registros hidrogeológicos regionales generados por el servicio geológico colombiano (SGC), sumado a un estudio realizado por Gómez (2017), en donde se observó las tendencias generalizadas tanto para la vereda de La Punta, como también para el municipio de Tenjo.

El rango generalizado obtenido con base en los diferentes estudios, demuestra que la zona tiene un potencial de protección alto frente a condiciones de contaminación elevadas, lo anterior basado en que los elementos químicos presentes en estos tipos de contaminantes sufren un transporte reducido debido a condiciones del suelo y de su misma conductividad hidráulica; presentan velocidades de movimiento en torno a los 20 y los 60 metros por año en comparación con medios con conductividad hidráulica alta, en donde este movimiento otorga rangos de hasta 290 metros por año. A su vez, los suelos compuestos por arcillas y lutitas presentan porcentajes de retención 10 veces superiores por encima de formaciones con componentes arenosos y de cantidad considerable de gravas (Benavides Guerrero et al., 2021).Lo anterior otorga una ponderación de vulnerabilidad de 1 debido a que la baja conducción hidráulica genera que tanto el medio acuoso como los posibles contaminantes que pudiera transportarse en este, se reduzcan de manera considerable debido a la velocidad de transporte de los mismos(Fertilab, 2018).

Figura 11. Mapa del parámetro de conductividad hidráulica, vereda la Punta.



Fuente: Propia - ArcMap 10.8

6.8 Índice de vulnerabilidad DRASTIC

Finalizado la operación de datos en el software ArcMap, se procedió a la sobreposición de los mapas basados en la información de diferentes fuentes, estudios y entidades sobre la vereda La Punta con el fin de obtener tanto el mapa temático de la vulnerabilidad intrínseca presente el sistema de acuíferos de la vereda como de los valores finales de ponderación de los siete parámetros determinados por la metodología DRASTIC como se observa en la Figura 12. En el apartado de resultados por variable, se presentan las tablas con los valores resultantes que expresan el diagnostico actual de la situación del recurso hídrico subterráneo de la vereda La Punta.

6.8.1. Resultados por variable

La Tabla 6, presenta los resultados relacionados con la profundidad hasta el nivel freático, mostrando diferentes rangos de profundidad (en metros) asociados a un valor numérico y un factor de ponderación. Al multiplicar estos dos componentes se obtiene un índice Dr_Dw. Estos datos permiten evaluar la variabilidad del nivel freático en función de su profundidad, asignando una mayor ponderación e índice a profundidades menores, que podrían indicar mayor vulnerabilidad o impacto en el sistema acuífero (Angelone,2006).

Tabla 6. Resultados variables del nivel freático

PROFUNDIDAD HASTA EL NIVEL FREATICO			
PROFUNDIDAD m	VALOR	FACTOR DE PONDERACION	DR_DW
> 31	1	5	5
31-23	2		10
23-15	3		15
15-9	5		25
9-5	7		35

Fuente: Propia

Los resultados correspondientes a la variable de recarga neta se observan en la Tabla 7, clasificando el rango de recarga (en mm/año) junto con su valor, factor de ponderación e índice Rr_Rw. Este parámetro es clave para determinar la capacidad del acuífero de reponerse, siendo mayor la ponderación en rangos de recarga más significativos (Vélez & Vásquez, 2004).

Tabla 7. Resultados variables de la recarga neta

RECARGA NETA			
RECARGA	VALOR	FACTOR DE PONDERACION	Rr_Rw
103-50	3	4	15

Fuente: Propia

La tabla 8, presenta la clasificación litológica del acuífero, asignando un valor, un factor de ponderación y el índice Ar_Aw. En este caso, se considera la presencia de lutita masiva, la cual, debido a su baja permeabilidad, influye en la reducción de la vulnerabilidad del sistema frente a la contaminación (Auge, 2007).

Tabla 8. Resultados variables de la litología del acuífero

LITOLOGIA DEL ACUIFERO			
LITOLOGIA	VALOR	FACTOR DE PONDERACION	Ar_Aw
Lutita masiva	2	3	6

Fuente: Propia

la clasificación del tipo de suelo en el área de estudio se presenta en la Tabla 9, asignando un valor, un factor de ponderación y el índice Sr_Sw. Se identifica el suelo franco arcilloso, el cual, por su textura y baja permeabilidad, tiende a reducir la vulnerabilidad del acuífero frente a la infiltración de contaminantes (Auge, 2007).

Tabla 9. Resultados variables del tipo de suelo

TIPO DE SUELO			
SUELO	VALOR	FACTOR DE PONDERACION	Sr_Sw
Franco arcilloso	3	2	6

Fuente: Propia

La tabla 10, presenta la distribución de las pendientes del terreno en rangos porcentuales, junto con su valor asignado, el factor de ponderación y el índice Tr_Tw. Se observa que las zonas con menor pendiente reciben valores y ponderaciones más altos, ya que estas áreas presentan mayor capacidad de infiltración, lo que incrementa la vulnerabilidad del acuífero ante la presencia de contaminantes (Ruiz & Martínez, 2015).

Tabla 10. Resultados variables de la topografía

TOPOGRAFIA			
PENDIENTE (%)	VALOR	FACTOR DE PONDERACION	Tr_Tw
18,90 - 45,5	1	1	1
10,10 – 18,80	3		3
5,90 - 10	5		5
2,33 – 5.89	9		9
0 – 2,32	10		10

Fuente: Propia

la caracterización de la zona vadosa detallada en la Tabla 11, especifica el tipo de material, su valor asignado, el factor de ponderación y el índice resultante I_r_{lw} . En este caso, se identifica la presencia de lutita, la cual recibe un valor de 3 y un factor de ponderación de 5. Al multiplicar estos dos componentes, se obtiene un índice I_r_{lw} de 15, que refleja la contribución de esta variable a la vulnerabilidad del acuífero. Este índice expresa que, aunque la lutita es de baja permeabilidad y puede actuar como barrera, su capacidad de protección frente a la contaminación no es absoluta y debe considerarse en conjunto con las demás variables (Martínez & Fabregat, 1998).

Tabla 11. Resultados variables de la naturaleza de la zona no saturada

NATURALEZA DE LA ZONA NO SATURADA			
ZONA VADOSA	VALOR	FACTOR DE PONDERACION	I_r_{lw}
LUTITA	3	5	15

Fuente: Propia

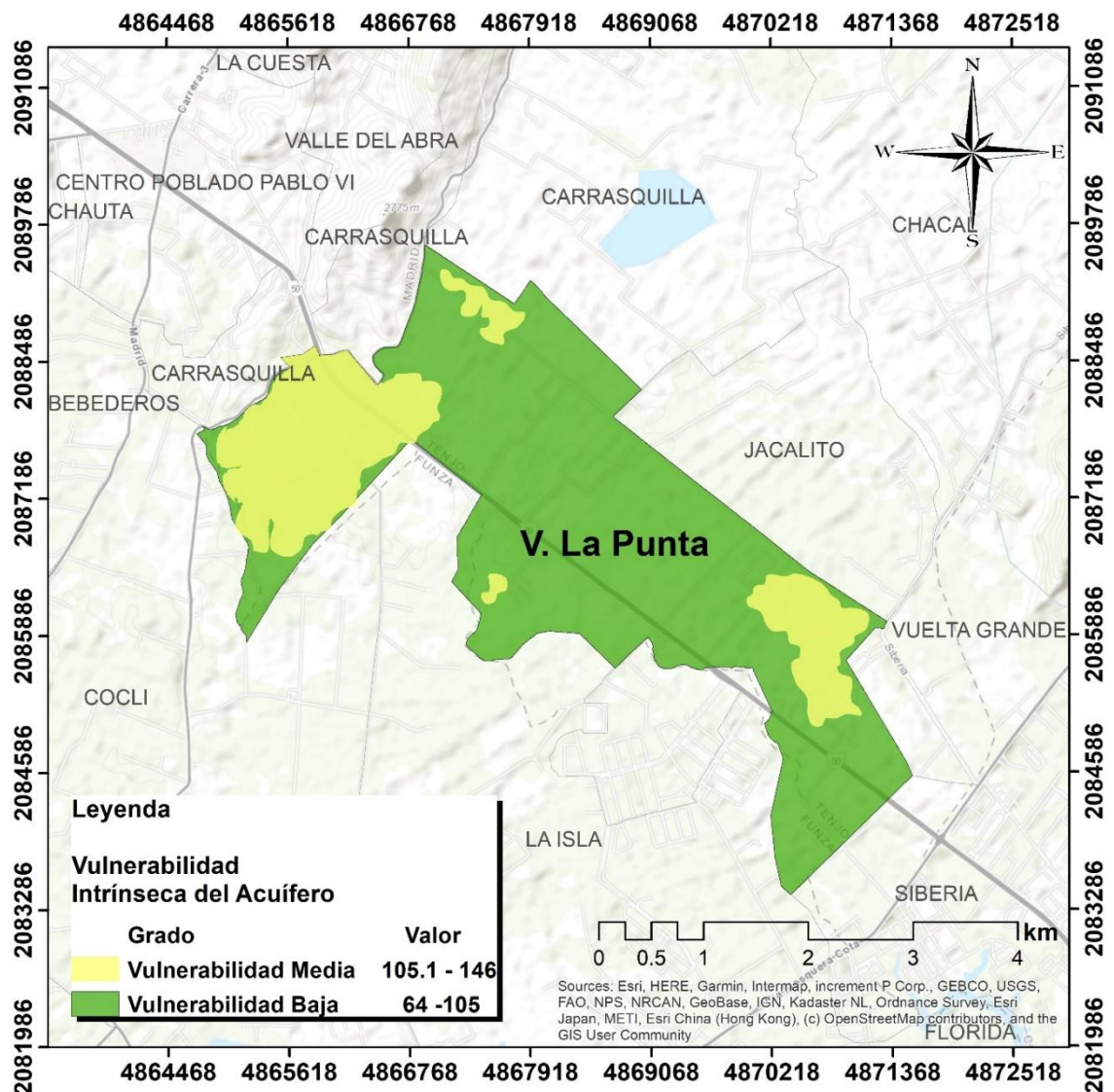
Por último, la tabla 12, expone el valor Cr_{Cw} obtenido a partir de la multiplicación del valor de conductividad hidráulica y el factor de ponderación tomado de tanto el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible(MADS); como de la EPA (Environmental Protection Agency). Este índice demuestra la baja vulnerabilidad que posee el sistema de acuíferos frente al transporte interno de contaminantes (Ruiz & Martínez, 2015).

Tabla 12. Resultados variables de la conductividad hidráulica

CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA			
Conductividad hidráulica (m/día)	VALOR	FACTOR DE PONDERACION	Cr_Cw
0,05-5	1	3	3

Fuente: Propia

Figura 12. Mapa del índice de vulnerabilidad de la vereda la Punta.



Fuente: Propia - ArcMap 10.8

El resultado obtenido en la Figura 12, se considera el mapa final de vulnerabilidad intrínseca del sistema de acuíferos presente en la vereda de La Punta, en el municipio colombiano de Tenjo bajo la metodología DRASTIC; en este se observan dos índices marcados notoriamente en el área de estudio, tanto una vulnerabilidad baja como una vulnerabilidad de carácter media. La primera

identificada bajo un color verde en la gran mayoría de la planicie de la vereda, lo cual se interpreta que el sistema de acuíferos bajo esta área tiene una vulnerabilidad baja frente a posibles factores contaminantes tanto antropogénicos como naturales debido a múltiples propiedades como la distancia mayor del nivel freático frente a otras áreas de la vereda y la composición de sus sedimentos y rocas. Sumado a lo anterior, de acuerdo con el POT del municipio de Tenjo actualizado con la demanda creciente poblacional, se infiere que la zona de baja vulnerabilidad posee una densidad población mínima respecto a la parte occidental y oriental de la vereda.

Por su parte, el índice que denomina la vulnerabilidad media en el mapa se denota con un color amarillo, el cual se evidencia claramente en los costados occidental y oriental de la vereda de La Punta; su índice más elevado con respecto al anterior se debe a que esta zona tiene una densidad poblacional mayor; de acuerdo a proyecciones y censos realizados por la alcaldía de Tenjo, el promedio para las zonas de vulnerabilidad media es de aproximadamente 190 habitantes/km², lo cual comparado frente a la zona que presento vulnerabilidad baja denota un aumento de aproximadamente 100 habitantes por kilómetro cuadrado. Además de un número mayor de instituciones, industrias y propiedades residenciales privadas por encima de las de la zona central de la vereda en un porcentaje cercano al 38 % de acuerdo con el último registro actualizado de plan de ordenamiento territorial del municipio en cuestión.

El aumento de la demanda de agua para diversas actividades tanto industriales, de agricultura, ganadería y actividades menores genera que sumado a la poca profundidad del nivel freático en estas zonas como se corroboró en el primer parámetro aumentan la vulnerabilidad debido al consumo elevado del recurso hídrico extraído mediante pozos, que puede producir una inestabilidad en la estructura y recarga del acuífero, afectando seriamente la interacción y fluctuación de los acuíferos, en el mismo sistema en el que se encuentran. Según CAR (2024), el total de pozos inventariados en el municipio de Tenjo supera los 210, un 40% más comparado frente al último diagnóstico de vulnerabilidad aplicado en la zona de Tenjo en el año 2017.

Finalmente, en la Tabla 13 se observa los porcentajes entre la relación del área total de la zona de estudio y el porcentaje de área que se establece para cada índice de vulnerabilidad obtenido bajo la metodología DRASTIC.

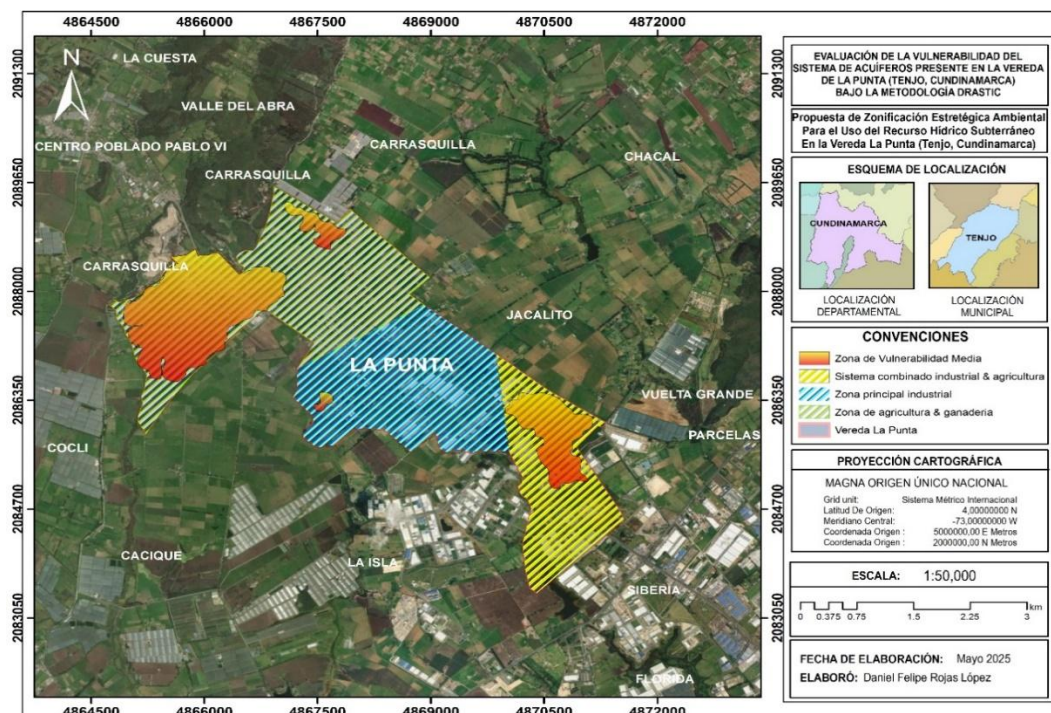
Tabla 13. Proporción de los resultados de los indicadores en área (h)

INDICE DRASTIC	Área que ocupa en hectáreas	Porcentaje que ocupa en el área total (%)
VULNERABILIDAD BAJA	854,3 h	67.86
VULNERABILIDAD MEDIA	404.7	32.14

Fuente: Propia

6.9 Zonificación estratégica ambiental

Figura 13. Mapa de la propuesta de zonificación estratégica ambiental en la vereda la Punta.



Fuente: Propia - ArcMap 10.8

La Figura 13, interpreta la propuesta de una zonificación estratégica ambiental para el uso del sistema de acuíferos pertenecientes al recurso hídrico subterráneo de la vereda de la Punta (Tenjo, Cundinamarca); elaborado a partir de los datos de vulnerabilidad intrínseca proporcionados por el modelo DRASTIC y datos suministrados por la alcaldía municipal de Tenjo entre los que se encuentran el plan de ordenamiento territorial del municipio y el uso actual de suelos que se está ejecutando en la jurisdicción de este.

Para esta propuesta se establece realizar un cambio en los usos actuales del suelo designados por la alcaldía para la planicie de la vereda de la Punta; esto con el fin de garantizar la existencia y buen funcionamiento de las dinámicas hídricas existentes en la serie de acuíferos presentes en la formación Guadalupe de la zona de estudio. Con base a los resultados obtenidos después de la aplicación de la metodología DRASTIC en la vereda, se plantea que las áreas designadas en colores verde sean facultadas como zonas para uso exclusivo de agricultura y ganadería extensiva. Las zonas de color amarillo se plantean para que bajo el cambio en el plan de ordenamiento se designen como sistemas combinados entre actividades industriales, ganaderas y de agricultura.

Lo anterior se basa en la necesidad de protección de esas áreas frente a sobreexplotación de los cuerpos subterráneos de agua debido a que las dos zonas anteriormente mencionadas poseen características mínimas en cuanto a la recarga neta debido a la poca profundidad del nivel freático, lo que puede causar una contaminación de estos sistemas de manera alarmante. La propuesta presentada toma en cuenta una zonificación integrada ya que se evalúa la vulnerabilidad calculada por una metodología que ha sido aprobada para Colombia y que demuestra rasgos altos en similitud frente a las condiciones reales de dinámicas de subsuelo e hídricas. También se toma en cuenta el componente social y económico en el que se desarrolla la vereda, ya que basados en el plan de ordenamiento territorial, actualmente el municipio de Tenjo realiza proyectos que generan una sostenibilidad en el ecosistema y que a su vez están en constante contacto e interacción con el componente social y económico de la zona; debido a lo anterior es que para la propuesta de zonificación estratégica ambiental se plantea una zona designada en color azul

en donde las condiciones son favorables para que la alcaldía autorice estudios hidrogeológicos a detalle, con el fin del traslado de pozos que poseen una concesión de extracción de recurso hídrico mayor al promedio y que están ubicados en zonas de vulnerabilidad media; lo anterior con el objetivo de trasladarlos a zonas que cuentan con condiciones favorables, para evitar un daño en la dinámica total de los acuíferos de la Vereda de Tenjo , Cundinamarca. La importancia del cambio radica en que al modificar y transformar las condiciones actuales en las que se encuentra designado y dispuesto el plan de ordenamiento territorial, generará la modificación de los diferentes puntos en los que actualmente se encuentran funcionando diversos pozos de extracción; lo que basado en los resultados del presente estudio en materia de vulnerabilidad ,ocasionaría que la zona propuesta de color azul, albergue los nuevos puntos de extracción, provocando una mejoría paulatina en los indicadores de vulnerabilidad que presenta tanto la parte oriental como occidental de la vereda. Esto entendido bajo el hecho de que la reducción de extracción en la zona amarilla adaptaría de nuevo los diferentes factores que rodean los acuíferos semiconfinados presente; con miras a una posible recuperación de estos para su uso futuro en nuevas actividades generadas por el crecimiento poblacional basado en las diferentes estadísticas otorgadas por el DANE para los próximos 20 años en la región de la sabana de Bogotá; en donde un aumento del 20% en la población que habita la vereda de la Punta, sin tener en cuenta la situación actual del sistema de acuíferos ,generaría un daño irreparable en las dinámicas de recarga y recuperación de las estructuras acuíferas (Cruz,2025).

7. IMPACTO SOCIAL Y HUMANÍSTICO DEL PROYECTO

El presente proyecto tiene un impacto altamente significativo en distintos ámbitos como lo son el social y el ambiental debido a las múltiples respuestas que entrega a una problemática de consideración riesgosa. Esta problemática basada en la vulnerabilidad del sistema de acuíferos que son fuente fundamental de la dinámica económica y de bienestar de la población generan bastantes

dudas y preguntas sobre muchos aspectos del recurso hídrico. Este proyecto al analizar la vulnerabilidad desde una perspectiva técnica y científica entrega respuestas que representan un paso fundamental a la finalidad de protección del recurso hídrico, que es vital para la comunidad local.

Por su parte, sumado a la presentación de resultados de índole técnico, la finalidad del proyecto es generar conciencia sobre la vulnerabilidad del recurso hídrico subterráneo al presentar evidencias contundentes que generan una alarma temprana sobre la situación actual de este; generando y fomentando así, la cultura del uso sostenible, responsable y activo tanto del agua subterránea, como también cualquier tipo de fuente en la que sea extraída para su uso en actividades múltiples; dando cabida a la creación de nuevas regulaciones y normativas en favor de proteger y administrar correctamente el tan preciado elemento.

Todo lo anterior, se fundamenta y respalda bajo el hecho de la importancia del derecho que tiene los ciudadanos a recibir un suministro correcto y fiable de agua, sin importar el estrato social o algún tipo de diferenciador social. Siendo el recurso hídrico un indicador principal de la calidad de vida de las personas. Esto diversifica el pensamiento técnico del proyecto y lo ancla a valores éticos basados en la sostenibilidad, la equidad y la justicia de carácter ambiental y social; contribuyendo a la creación y expansión de una conciencia crítica generalizada y positiva frente al entorno ambiental.

8.CONCLUSIONES

En la vereda La Punta, se aplicó el modelo DRASTIC para evaluar la vulnerabilidad intrínseca del sistema de acuíferos subterráneos. Los resultados obtenidos indicaron valores que oscilan entre los 64 y los 146, clasificando la zona en categorías de vulnerabilidad baja y vulnerabilidad media. Esto sugiere un sistema acuífero, que, basado en diferentes factores internos, se encuentra en condiciones levemente favorables; no obstante, las áreas obtenidas bajo

condiciones de vulnerabilidad media requieren un especial cuidado por parte de las diferentes entidades ambientales y los futuros planes de gestión hídrica por parte de la alcaldía de Tenjo.

El parámetro de conductividad hidráulica presenta un patrón homogéneo en la distribución total del área de estudio, lo que produce que las condiciones de capacidad entorno a la transmisión y transporte del recurso hídrico sean extremadamente bajas. Lo anterior reduce la posibilidad de propagación de posibles elementos contaminantes que pudieran afectar la integridad del sistema de acuíferos, sin embargo, la poca capacidad de infiltración en el medio poroso, dificulta la recarga neta de las diferentes estructuras de almacenamiento hídrico subterráneo pertenecientes a la formación Guadalupe.

Basados en las características descritas en la litología del área de estudio como también en las unidades cronoestratigráficas de la misma, permiten inferir un comportamiento en la mayoría de estructuras del sistema subterráneo de características semiconfinadas. Lo anterior generado por las diferentes interacciones de factores y materiales geológicos de la formación Guadalupe.

La cobertura de información sobre la vulnerabilidad del sistema integrado de acuíferos de la vereda La Punta y el municipio de Tenjo, ha mejorado respecto a información de estudios anteriores, esto debido a las diversas metodologías que han sido aplicadas en los últimos años, como lo son las basadas en el modelo DRASTIC.

La zonificación estratégica ambiental planteada para la gestión del recurso hídrico de la vereda La Punta, representa una herramienta estratégica útil para una posible aplicación en las condiciones actuales del sistema de acuíferos. La efectividad de la zonificación podría ser potenciada mediante un mayor ajuste en los requisitos de explotación contemplados en las normativas regidas

actualmente por la alcaldía de Tenjo y la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR).

El uso del software ArcMap facilitó el análisis de información existente sobre los parámetros requeridos por el modelo DRASTIC, lo cual generó un alto nivel de certeza y proximidad frente a las dinámicas existentes del sistema de acuíferos.

Finalmente se concluye que el modelo DRASTIC resultó ser compatible y correctamente adaptable a los distintos factores y variables hidrogeológicas existentes en Colombia, entre las que más se destacan son las variables la topográficas, morfológicas del suelo y subsuelo. Su aplicación demuestra ser adecuada para estudios de vulnerabilidad en regiones con características geológicas y ambientales similares a las del presente documento.

9.RECOMENDACIONES

Se recomienda a la corporación autónoma regional (CAR) realizar un seguimiento y control exhaustivo sobre las concesiones otorgadas en el municipio de Tenjo y sobre todo en la vereda de La Punta, esto debido a que se encontraron discrepancias muy significativas en el inventario de pozos que posee esta entidad.

Se sugiere realizar un estudio más detallado en la dinámica actual del nivel freático de la vereda de La Punta, esto debido a que se necesita datos más detallados sobre esta zona para poder realizar los futuros análisis de vulnerabilidad con mayor detalle a la realidad del sistema.

La alcaldía de Tenjo es una de las principales responsables de la vigilancia y control del recurso hídrico subterráneo, por eso se sugiere la realización de una actualización de los datos existentes en torno al plan de ordenamiento territorial con el fin de realizar modelos de sostenibilidad más eficientes y prologados.

Se recomienda al IDEAM la actualización de su base de datos en la zona, ya que es esencial el registro y balance hídrico del área para entender en mayor profundidad el dinamismo interno del subsuelo.

Se sugiere la realización de un próximo estudio de vulnerabilidad bajo la metodología DRASTIC en un tiempo no mayor a 2 años con el fin de evidenciar posibles cambios significativos en los indicadores obtenidos.

10.REFERENCIAS

- Abu-Bakr, h. a. el a. (2020). Groundwater vulnerability assessment in different types of aquifers. *agricultural water management*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106275>
- Alam, f., Umar, r., Ahmed, s., & Dar, f. a. (2014). A new model (drastic-lu) for evaluating groundwater vulnerability in parts of central ganga plain, india. *arabian journal of geosciences*, 7(3). <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0796-y>
- Aller, l., Bennett, t., Lehr, j. h., Petty, r. j., & Hackett, g. (1987). Drastic: a standardized method for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. *nwwa/epa-600/2-87-035*.
- Alulema del salto, r. a., & López vera, s. (2016). Análisis de vulnerabilidad a la contaminación en los acuíferos de la unidad hidrogeológica Huaquillas. *figempa: investigación y desarrollo*, 1(2). <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i2.892>
- Angelone, S., Garibay, M. T., & Casaux, M. C. (2006). Permeabilidad de suelos. *Geol. y Geotec—Permeabilidad Suelos*.
- Antonio-Fragala, f., & Obregón-Neira, n. (2011). Estimación de la recarga media anual en los acuíferos de la sabana de Bogotá. *ingeniería y universidad*, 15(1).
- Auge, M. P. (2007). Vulnerabilidad de acuíferos. *Serie Contribuciones Técnicas. Ordenamiento Territorial*.

- Barbulescu, a. (2020). Assessing groundwater vulnerability: drastic and drastic-like methods: a review. in water (switzerland) (vol. 12, issue 5).
<https://doi.org/10.3390/w12051356>
- Bartzas, g., Zaharaki, d., Hernández-Fernández, m. t., Moreno Ortego, j. l., & Komnitsas, k. (2015). Assessment of aquifer vulnerability in an agricultural area in spain using the drastic model. *environmental forensics*, 16(4).
<https://doi.org/10.1080/15275922.2015.1091407>
- Benavides Guerrero, c. e., Caro, l. e., & Mariño Martínez, j. e. (2021). Determinación del comportamiento hidráulico de los acuíferos del norte de la orinoquia, Colombia. *ciencia e ingeniería neogranadina*, 31(1).
<https://doi.org/10.18359/rcin.4680>
- Betancur-Vargas, t., García Giraldo, d. a., Vélez-Duque, a. j., Gómez, a. m., Flórez-Ayala, c., Patiño, j., & Ortiz-Tamayo, j. á. (2017). Aguas subterráneas, humedales y servicios ecosistémicos en Colombia. *biota colombiana*, 18(1). <https://doi.org/10.21068/c2017.v18n01a1>
- Catani, v., Zuzolo, d., Esposito, l., Albanese, s., Pagnozzi, m., Giorillo, f., De vivo, b., & Cicchella, d. (2020). A new approach for aquifer vulnerability assessment: the case study of campania plain. *water resources management*, 34(2). <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02476-5>
- Chamanehpour, e., Sayadi, m. Hossein, & Yousefi, e. (2020). The potential evaluation of groundwater pollution based on the intrinsic and the specific vulnerability index. *groundwater for sustainable development*, 10.
<https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100313>
- Colombia presidencia de la república. (1974). Decreto 2811 de 1974. diario oficial, 1974(diciembre 18).
- Cruz-Páez, F. O., Manjarres-Zarate, B. A., & Laverde-Guzmán, M. Y. (2025). Incidencia de la población migrante venezolana en la economía de la provincia sabana de occidente, Cundinamarca, Colombia. *Política, Globalidad y Ciudadanía*, 11(21), 75-88.
- Departamento administrativo de la función pública. (2002). Decreto 1729 de 2002. in presidencia de la república de Colombia.
- Ewusi, a., Asante-annor, a., Seidu, j., & Fosu-gyeabour, l. o. (2016). Groundwater vulnerability assessment using drastic index and gis in kumasi metropolitan assembly, Ghana. *Ghana mining journal*, 16(1).
<https://doi.org/10.4314/gmj.v16i1.3>
- Fertilab. (2018). la conductividad hidráulica del suelo. hidr, conductividad.
- Foster, s., & Hirata, r. (1991). Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas: god. in centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente / organización mundial de la salud (vol. 2).
- García, a. g. t. j. a. g., & Sarmiento, v. a. s. (2016). Estimación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero de la formación mesa presente en el municipio de puerto Boyacá del departamento de Boyacá, Colombia, mediante la metodología drastic.(45)23 ,
- Garzón, j. c. (2011). Evaluación de asentamientos por consolidación generada por descenso del nivel freático. universidad nacional de Colombia.

- Gómez, p. (2017). Evaluación de la vulnerabilidad hidrogeológica del acuífero Guadalupe en Tenjo Cundinamarca, con la implementación del modelo drastic. universidad de la Salle.
- González Forero, r., Méndez Torres, y. s., & Contenido Rubio, o. f. (2022). Policía ambiental y ecológica como garante de protección ante la contaminación del recurso suelo. revista logos ciencia & tecnología, 15(1). <https://doi.org/10.22335/rlct.v15i1.1703>
- Jacqueline Arroyo. (2016). La importancia de la materia orgánica y de las arcillas del suelo en la retención de contaminantes. ecuador es calidad: revista científica ecuatoriana, 4(1). <https://doi.org/10.36331/revista.v4i1.53>
- Julivert, m. (1962). Estudio sedimentológico de la parte alta de la formación Guadalupe al e de Bogotá. boletín de geología, 10(0).
- Karlin, m. s., Salazar, j. b., Cora, a., Sánchez, s., Arnulphi, s., & Accietto, r. (2019). Cambios en el uso del suelo: capacidad de infiltración en el centro de córdoba (argentina). ciencia del suelo, 37(2).
- Ley 99 de 1993, diario oficial (1993). <https://doi.org/10.1017/cbo9781107415324.004>
- Leyva, e. (2010). Acuíferos semiconfinados y su modelación: aplicaciones al acuífero de la zona metropolitana de la ciudad de México. tesis unam.
- Mc laughlin, d. h., & Arce h., m. (1971). Recursos minerales de parte de los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y meta. boletín geológico, 19(1). <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol19.1.1971.267>
- Madrigal-Solís, h., Fonseca Sánchez, a., & Reynolds-Vargas, j. (2017). Caracterización hidro geoquímica de los acuíferos volcánicos Barva y colima en el valle central de costa rica. tecnología y ciencias del agua, 08(1). <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-01-09>
- Mads. (2012). Decreto 1640 de 2012. minambiente.gov.co, 2012(agosto 2).
- Marín Benítez, a., Marín escobar, j., & Maury mena, s. (2018). Cultivos bajo invernadero: inventario y caracterización de los aspectos ambientales en el municipio de Tenjo, Cundinamarca. educación socioambiental.
- Marín-Benítez, a. c., Marín-escobar, j. c., Maury-mena, s. c., & Maury, a. (2023). Caracterización e inventario ambiental de cultivos bajo invernadero en Tenjo, Colombia. revista ion, 36(1). <https://doi.org/10.18273/revion.v36n1-2023006>
- Melo Martínez, c. e., & Malagón Márquez, a., d., & Forero, r. (2019). Interpoladores determinísticos espacio-temporales, series de tiempo y análisis de datos funcionales para el estudio y predicción de la precipitación en Cundinamarca y Bogotá d.c. 2017- 2020. revista de topografía azimuth.
- Minambiente. (2020). Decreto 1076 de 2015 sector ambiente y desarrollo sostenible. in departamento administrativo de la función pública. república de Colombia.
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2012). Decreto número 1640. in minambiente.gov.co.

- Ministerio de salud y protección social. (2022). Resolución 1407 de 2022. in gazeta institucional.
- Moges, s. s., & Dinka, m. o. (2021). Assessment of groundwater vulnerability using the drastic model: a case study of quaternary catchment a21c, limpopo river basin, south africa. *journal of water and land development*, 49. <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.137094>
- Mohammad, a. h., Almomani, t., & Alhejoj, i. (2015). Groundwater vulnerability for the surface outcropping aquifers in jordan. *journal of environmental protection*, 06(03). <https://doi.org/10.4236/jep.2015.63025>
- Montesino Torres, o. e., Gutiérrez Ribon, g., & Monroy Pineda, m. c. (2018). Avances de la contaminación ambiental en las aguas del golfo de Morrosquillo. *revista colombiana de ciencia animal - recia*, 6(2). <https://doi.org/10.24188/recia.v6.n2.2014.446>
- Montoya Arenas, d. m., & Torres Reyes, g. a. (2005). Geología de la sabana de Bogotá. instituto colombiano de geología y minería ingeominas.
- Newell, c. j., Hopkins, l. p., & Bedient, p. b. (1990). A hydrogeologic database for ground-water modeling. *groundwater*, 28(5). <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1990.tb01986.x>
- Oke, s. a. (2017). An overview of aquifer vulnerability. in *aquifers: properties, roles and research*.
- Ordoñez, j. (2021). Aguas subterráneas - acuíferos. sociedad geográfica de lima.
- Ourarhi, s., Barkaoui, a. e., Zarhloule, y., Kadiri, m., & Bouiss, h. (2024). groundwater vulnerability assessment in the triffa plain based on gis combined with drastic, sintacs, and god models. *modeling earth systems and environment*, 10(1). <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01801-7>
- Pacheco, f. a. l., Pires, l. m. g. r., Santos, r. m. b., & Sanches Fernández, l. f. (2015). Factor weighting in drastic modeling. *science of the total environment*, 505. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.092>
- Peña-Beltrán, z. y., & Pabón-Caicedo, j. d. (2020). Climatology of hailstorms in Colombia. *cuadernos de geografía: revista colombiana de geografía*, 29(1). <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.75438>
- Rendón Acevedo, j., Mora-Villalobos, c. a., Díaz Mateus, r. d., Gutiérrez Villamil, s., León Cárdenas, l. m., Álvarez Ochoa, c. p., Ramírez rave, c. m., & Martínez Prieto, a. (2023). Municipio de Tenjo (Cundinamarca): diagnóstico socioeconómico y de producción agropecuaria (2010-2019). [municipality of Tenjo (Cundinamarca): socioeconomic diagnosis and agricultural production (2010-2019).].
- Ruiz, D., & Martinez, G. (2015). Estimar la vulnerabilidad intrínseca de los sistemas acuíferos presentes en el área del municipio de Ambalema, departamento del Tolima, Colombia. *Universidad Católica de Colombia, Colombia*.
- Ruiz Molina, v. e., & Muñoz Perea, c. g. (2023). Determinación de velocidad de infiltración básica en tres áreas de ladera: Roldanillo, Dagua y pradera en valle del cauca, Colombia. *acta agronómica*, 71(2).

- Salazar, a. h., Altieri, m. á., Nicholls Estrada, c. i., Congreso de la república de Colombia, la ministra de ambiente, el presidente de la república de Colombia, & de, u. (2005). ley 373 de 1997. meta, 4(january).
- Sánchez Roman, j. (2022). Conceptos fundamentales de hidrogeología. in hidrología e hidrogeología (vol. 2ed).
- Torres quintero, j. e., Agudelo, n., & Ortiz, o. (2015). Evaluación de la vulnerabilidad del recurso hídrico subterráneo del municipio de cota Cundinamarca utilizando el modelo drastic. avances investigación en ingeniería, 12(1). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.263>
- Tuinhof, a., Dumars, c., Foster, s., Kemper, k., garduño, h., & Nanni, m. (2002). Groundwater management : gestión sustentable del agua and tools conceptos y herramientas. requerimientos de monitoreo del agua subterránea para manejar la respuesta de los acuíferos y las amenazas a la calidad de agua., nota 1.
- Ujueta Lozano, g. (1961). Geología del noreste de Bogotá. boletín geológico, 9(1–3). <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol9.1-3.1961.107>
- Vallejos, f., g., Revelo, s., & Elizabeth, c. (2021). Análisis espacio temporal de la variación de la calidad de agua de los acuíferos del cantón de Otavalo, ecuador. repositorio utn ec.
- Vélez Otálvaro, M. V., & Vásquez Ariza, L. M. (2004). Métodos para determinar la recarga de acuíferos. *Escuela de Geociencias y Medio Ambiente*.
- Vidal-Méndez, e. (2008). Cálculo de la conductividad hidráulica de los acuíferos a partir de la resistividad eléctrica. minería y geología, 24(2).
- Voutchkova, d. d., Schullehner, j., Rasmussen, p., & Hansen, b. (2021). a high-resolution nitrate vulnerability assessment of sandy aquifers (drastic-n). journal of environmental management, 277. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111330>