

Análisis de vulnerabilidad a la contaminación del Sistema Acuífero del Miembro Superior de la
Formación Los Santos, Mesa de los Santos - Santander (Colombia)

Luisa Casadiegos Agudelo

Trabajo de Grado para Optar al Título de Magister en Ingeniería Civil

Directora

Sully Gómez Isidro

ph.D. En Ingeniería

Codirectora

Isabel Cristina Domínguez Rivera

ph.D. En Agricultura, Alimentación y Desarrollo Rural

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Maestría en Ingeniería Civil

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios, porque Él usó a un hombre trabajador, responsable, bueno y protector llamado Ricaurte Casadiegos Osorio, y me formó en el vientre de mi amada, esforzada y amorosa madre, Flor Mary Agudelo Murcia, haciendo de mí un ser humano como cualquier otro que pisa esta tierra: capaz, inteligente, soñador... ¡Una creación maravillosa!; por eso, siempre doy gracias al Señor, porque todo lo que Él hace es maravilloso, y lo que he vivido hasta el momento no deja en mí dudas al respecto. Dios vio cuando mi cuerpo y mi intelecto, que provienen de Él, fue cobrando forma en las profundidades de lo desconocido; aun cuando mis padres y mis dos hermanos (Kicha y Heres) que llevo anclados en el corazón por la eternidad, aun cuando ellos, mi familia que me conoce muy bien... ellos lo ignoraban. Dios me veía y escribía mi historia, decidiendo cada paso de mi camino que fue compuesto de una familia perfecta para mí; siiiii, con algunas carencias económicas, pero muy feliz; Dios también me brindó una educación pública “digna” en el entorno en el que nací, con docentes esforzados; amigos leales, siempre presentes; compañeros de estudio exageradamente serviciales y tantas otras personas que han sido de tanta bendición para mi vida... Por eso a Dios, a mi Dios, a Jesús, siempre le dedicaré todos mis éxitos, que son mis sueños cumplidos; porque Dios me dio pasión por todo lo que hago, porque me dio salud, me dio felicidad en las dificultades, y proveernos esas cosas nos permite que podamos desarrollarnos plenamente en su buena voluntad y acumular mucha más felicidad (Salmos 139:13-16 TLA)

Agradecimientos

Agradezco al Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH - UIS) por recibirme como uno de sus miembros y asignarme un proyecto mediante el cual pude alcanzar este escalafón universitario. De igual forma, agradezco a mis directoras Sully, Isabel y a la estudiante de doctorado María por su tiempo y conocimiento brindado durante el proceso de esta investigación. Finalmente, gracias al proyecto “Estudio Integral del Agua en la Mesa de los Santos – 2534 de la VIE” por la financiación.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Formulación del Problema.....	18
2. Justificación	22
3. Revisión Bibliográfica	25
3.1 Marco Teórico.....	25
3.1.1 Vulnerabilidad a la contaminación	25
3.1.2 Métodos para la evaluación de la vulnerabilidad.....	26
3.1.3 Validación de la vulnerabilidad	31
3.1.4 Niveles de Fondo Químico Natural (NBL).....	32
3.2 Estado del Arte.....	34
3.2.1 Vulnerabilidad.....	34
3.2.2 DRASTIC Y DRASTIC Modificado.....	37
3.2.3 Validación de la vulnerabilidad	39
3.2.4 Niveles de Fondo Químico Natural (NBL).....	40
4. Objetivos.....	43
4.1 Objetivo General.....	43
4.2 Objetivos Específicos.....	43
5. Generalidades del Área de Estudio.....	44
5.1 Localización y Aspectos Fisiográficos del Área de Estudio.....	44
5.2 Marco Geológico	45
6. Metodología.....	49

6.1	Fase 1. Establecimiento de un Modelo Conceptual Preliminar para el Sistema Acuífero ..	50
6.1.1	Revisión bibliográfica.....	50
6.1.2	Actualización del inventario de puntos de agua	53
6.1.3	Toma de datos de características fisicoquímicas	55
6.1.4	Georreferenciación del inventario de puntos actualizado	55
6.1.5	Revisión de aspectos geológicos e hidrogeológicos en campo.....	56
6.2	Fase 2. Análisis de Vulnerabilidad	56
6.3	Fase 3. Validación de Mapas de Vulnerabilidad a Partir del Fondo Químico Natural.....	65
7.	Resultados y Discusión.....	70
7.1	Modelo Hidrogeológico Conceptual Preliminar.....	70
7.2	Análisis de la Vulnerabilidad.....	76
7.2.1	Método DRASTIC	82
7.2.2	Método DRASTIC Modificado	83
7.2.3	Comparación entre DRASTIC y DRASTIC Modificado	85
7.3	Validación de la vulnerabilidad a partir del Nivel de Fondo Químico Natural (NBL)	86
8.	Conclusiones.....	97
9.	Recomendaciones	101
	Referencias Bibliográficas	103
	Anexos	135

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Categorías de vulnerabilidad del Método DRASTIC	30
Tabla 2. Información hidrológica disponible.....	51
Tabla 3. Información disponible en los informes de concesión de agua subterránea.....	51
Tabla 4. Factores de valoración para cálculo de vulnerabilidad usando DRASTIC y DRASTIC Modificado.....	58
Tabla 5. Valores límites para los índices de vulnerabilidad DRASTIC (ID) y DRASTIC Modificado (IDM)	59
Tabla 6. Coberturas y usos asociados	64
Tabla 7. Áreas por clase de vulnerabilidad DRASTIC y DRASTIC Modificado.....	81
Tabla 8. NBL y estadística básica de las concentraciones de los iones de NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} y Cl^- contenidos en las aguas subterráneas del Acuífero Somero	86
Tabla 9. NBL y estadística básica de las concentraciones de los iones de NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} y Cl^- contenidos en las aguas subterráneas del Acuífero Superior	87
Tabla 10. Proporción de áreas ocupadas por cada clase de vulnerabilidad DRASTIC donde se superan los NBL para NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} y Cl^- en época lluviosa y época seca	88

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Localización del área de estudio con referencia a Sudamérica	45
Figura 2. Geología del área de estudio.....	46
Figura 3. Formación Los Santos en la sección estratigráfica de La Navarra.....	47
Figura 4. Estructura general de la metodología de investigación.	49
Figura 5. Localización de estaciones y puntos de concesión de agua subterránea	53
Figura 6. Localización de los puntos del inventario actualizado	54
Figura 7. Diagrama esquemático de la recarga del nivel freático.....	60
Figura 8. Localización del muestreo de suelos para determinación de texturas.	62
Figura 9. Localización del muestreo de agua subterránea para hidroquímica.....	68
Figura 10. Modelo hidrogeológico conceptual preliminar	71
Figura 11. Flujo del agua subterránea en el Acuífero Superior	73
Figura 12. Conductividad Eléctrica del sistema acuífero del Miembro Superior de la Formación Los Santos.....	74
Figura 13. pH del sistema acuífero del Miembro Superior de la Formación Los Santos.....	75
Figura 14. Mapas de puntuación de los parámetros evaluados en los métodos DRASTIC y DRASTIC modificado	77
Figura 15. Mapas de vulnerabilidad intrínseca.....	81
Figura 16. Áreas donde las concentraciones de NO ₃ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , SO ₄ ²⁻ y Cl ⁻ superan sus NBL en época de lluvia y época seca y su comparación con el mapa de vulnerabilidad obtenido por el método DRASTIC.	90

Figura 17. Áreas donde las concentraciones de NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} y Cl^- superan sus NBL en época de lluvia y época seca y su comparación con el mapa de vulnerabilidad obtenido por el método DRASTIC Modificado..... 91

Lista de Anexos

	Pág.
Anexo A. Inventario actualizado de puntos de agua subterránea	135
Anexo B. Características estratigráficas del Miembro Superior de la Formación Los Santos (K11sms).....	138
Anexo C. Descripción del código SWB	142
Anexo D. Determinación textural de suelos	159
Anexo E. Descripción y análisis de perforaciones.....	175
Anexo F. Pruebas de bombeo	194
Anexo G. Hidroquímica de agua subterránea 2008	196
Anexo H. Hidroquímica de agua subterránea en época lluviosa	199
Anexo I. Hidroquímica de agua subterránea en época seca.....	200
Anexo J. Mapa hidrogeológico de la zona de estudio a escala 1:25.000.....	201
Anexo K. Variables usadas en los mapas de vulnerabilidad siguiendo los modelos DRASTIC y DRASTIC Modificado a escala 1:25.000	201
Anexo L. Mapas de vulnerabilidad obtenidos por el método DRASTIC y DRASTIC Modificado a escala 1:25.000.....	201
Anexo M. Estadística para la determinación de los Niveles de Fondo Químico Natural.....	202
Anexo N. Mapas de vulnerabilidad Vs Nivel de Fondo Químico Natural a escala 1:25.000	210

Glosario

A: aljibe

J₁₋₂J: formación Jordán

J₁gp: granito de pescadero

K₁lsmi: miembro Inferior de la Formación Los Santos

K₁lsmm: miembro Medio de la Formación Los Santos

K₁lsms: miembro Superior de la Formación Los Santos

K₁p: formación Paja

K₁r: formación Rosa Blanca

K₁t: formación Tablazo

M: manantial

NBL: Niveles de Fondo Químico Natural

Oss: formación Silgará

P: pozo

Q: depósito Cuaternario

Resumen

Título: Análisis de vulnerabilidad a la contaminación del Sistema Acuífero del Miembro Superior de la Formación Los Santos, Santander (Colombia)*

Autora: Luisa Casadiegos Agudelo **

Palabras Clave: Contaminación del agua subterránea, vulnerabilidad intrínseca, DRASTIC, DRASTIC modificado, Nivel de fondo químico natural, acuífero siliciclástico.

Descripción: Los acuíferos constituyen una reserva de agua importante que es vital para las poblaciones con déficit de agua superficial y potable; sin embargo, el desconocimiento de su naturaleza y las actividades antrópicas que se realizan sin medidas restrictivas, hacen que el recurso subterráneo pueda ser susceptible a la contaminación. Este trabajo se centra en la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de los acuíferos siliciclásticos del Miembro Superior de la Formación Los Santos (K₁lsm), correspondientes al Acuífero Somero (libre) y Acuífero Superficial (libre, localmente semiconfinado y fracturado), presentes en la Mesa de Los Santos (Santander, Colombia). Se aplicó el método DRASTIC y un método DRASTIC Modificado que incluye la evaluación de dos parámetros adicionales correspondientes al uso de suelo y las características del fracturamiento (densidad y zonas con fracturas abiertas o cerradas), parámetros ignorados pero fundamentales en la vulnerabilidad de este tipo de configuraciones hidrogeológicas. La validación de los mapas de vulnerabilidad contó con la identificación de zonas donde se superaba la concentración de los Niveles de Fondo Químico Natural (percentil 90) de cuatro iones indicadores de contaminación (NO₃⁻, PO₄³⁻, SO₄²⁻ y Cl⁻) a partir de análisis hidroquímicos realizados en el año 2008 y análisis de hidroquímica realizada en el año 2021 (época lluviosa) y 2022 (época seca). Los resultados indican que el método DRASTIC Modificado muestra de manera más clara la alta vulnerabilidad a la contaminación que presenta el sistema acuífero en estudio y el efecto negativo en las aguas subterráneas del miembro Superior de la Formación Los Santos causado por las actividades antrópicas en la zona.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Maestría en Ingeniería Civil. Directora: Sully Gómez Isidro. PhD. Codirector: Isabel Cristina Domínguez. PhD.

Abstract

Title: Analysis of vulnerability to contamination of the Aquifer System of the Upper Member of the Los Santos Formation, Santander (Colombia)*

Author(s): Luisa Casadiegos Agudelo**

Key Words: groundwater contamination, intrinsic vulnerability, DRASTIC, Modified DRASTIC, Natural Background Levels, siliciclastic aquifers.

Description: Aquifers are an essential water source for populations in water-scarce regions. However, lack of knowledge regarding the groundwater's nature and anthropic activities developed without control make groundwater susceptible to contamination. This work focuses on the evaluation of the intrinsic vulnerability to contamination of the siliciclastic aquifers of the Upper Member of the Los Santos Formation (K1lsms), the Shallow Aquifer (free), and Superficial Aquifer (free, locally semi-confined and fractured), located at the Mesa de Los Santos (Santander, Colombia). The DRASTIC and a Modified DRASTIC methods were applied. The Modified DRASTIC includes two additional parameters: i) land use and ii) fracturing characteristics (density and areas with open or closed fractures) since these parameters strongly influence the vulnerability of these hydrogeological configurations. The vulnerability map validation included identifying areas where the concentration of the Natural Chemical Background Levels (90th percentile) of four contamination indicator ions (NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , and Cl^-) was exceeded. These concentrations were obtained from hydrochemical tests in 2008, 2021 (rainy season), and 2022 (dry season). The results indicate that the modified DRASTIC method better represents the high vulnerability to contamination of the studied aquifer system and the negative effect of human activities in the area.

* Master Thesis

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Civil Engineering Department, Master of Science in Civil Engineering. Advisor: Sully Gómez Isidro. PhD. Co-advisor: Isabel Cristina Domínguez. PhD.

Introducción

El uso global de agua aumenta a un ritmo constante de un 1% cada año debido al crecimiento demográfico, al desarrollo económico y al cambio de los patrones de consumo de las poblaciones (UNESCO, 2021). Dado que las aguas subterráneas representan el 99% de la totalidad de agua dulce en estado líquido de la tierra, se han convertido en fuente de abastecimiento fundamental para la lucha mundial contra la pobreza, promover la seguridad alimentaria e hídrica, la creación de empleos dignos, el desarrollo económico y la resiliencia de las sociedades y de las economías al cambio climático (UNESCO, 2022). Sin embargo, existen actividades antrópicas que amenazan la calidad de las aguas subterráneas, relacionadas con la falta o inadecuada operación y mantenimiento de los sistemas de alcantarillado, la ausencia de tratamiento de aguas residuales, el cambio en los usos del suelo y la expansión de la frontera agrícola. Estas actividades generan diferentes tipos de contaminantes que, dentro de ambientes hidrogeológicos vulnerables, pueden alcanzar las áreas saturadas y afectar adversamente la calidad de las aguas subterráneas (Jamali et al., 2020; Salman et al., 2019).

El estudio de la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas constituye un insumo útil para la toma de decisiones sobre el uso del suelo, la planificación del desarrollo sostenible, identificación de áreas sensibles, priorización de áreas para mayor monitoreo o protección y educación del público en general (Aragão et al., 2020; Duhalde et al., 2018). Vrba & Zaporozec (1994) definen la vulnerabilidad de las aguas subterráneas como una propiedad intrínseca en función de las características del acuífero, la superposición del suelo y los materiales geológicos.

Diferentes métodos están disponibles para evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación incluyendo los métodos de superposición. Estos métodos se basan en la combinación de diferentes parámetros condicionados por las características hidrogeológicas de la zona de estudio, donde cada parámetro se califica cuantitativamente y se le asigna diferentes valores de ponderación para determinar el resultado final, el cual corresponde al índice numérico de vulnerabilidad. Entre estos métodos, el índice DRASTIC (D = Profundidad del agua subterránea; R = Recarga; A = Litología del acuífero; S = Tipo de suelo; T = Topografía; I = Impacto en el acuífero; C = Conductividad Hidráulica) es uno de los más usados a nivel internacional para evaluar la vulnerabilidad de acuíferos detríticos libres (Ifediegwu & Chibuikwe, 2021; Agudelo et al., 2020; Machiwal et al., 2018); sin embargo, DRASTIC tiene limitaciones, como suponer un rango y peso de parámetros iguales para cualquier región (Agudelo et al., 2020).

Para superar las limitaciones descritas y mejorar los resultados esperados del índice de vulnerabilidad, en diversos estudios se han agregado o ignorado algunos parámetros de acuerdo con la disponibilidad y calidad de la información existente para cada contexto de estudio (p. ej. de Souza et al., 2022; Agudelo et al., 2020), incluso, se han modificado las escalas de valoración de rangos y pesos de los parámetros involucrados mediante la aplicación de diferentes técnicas como la lógica difusa y el proceso de jerarquía analítica (p. ej. Chamanehpour et al., 2020; Jones et al., 2019; Rufino et al., 2019; Entezari et al., 2016; Sener & Davraz, 2013). Estas formas modificadas del método DRASTIC original reciben el nombre de DRASTIC Modificado.

Debido a que la aplicación de distintos métodos de estimación de vulnerabilidad en una misma área de análisis arroja resultados diferentes, se hace necesario que cada método aplicado pase por un proceso de validación (Machiwal et al., 2018). Algunos investigadores han validado la vulnerabilidad mediante pruebas de trazadores (p. ej. Jiang et al., 2014; Ravbar & Goldscheider,

2007) o mediante la relación entre el índice de vulnerabilidad y la concentración de elementos prominentes de la calidad del agua subterránea relacionados con las actividades antrópicas, como por ejemplo el nitrato (Gautam et al., 2021; Jamali et al., 2020; Rufino et al., 2019). Por su parte, Aragão et al. (2020) utilizan los Niveles de Fondo Químico Natural (NBL) de nitrato (NO_3^-), fosfatos (PO_4^{3-}), sulfatos (SO_4^{2-}) y cloruros (Cl^-) para validación de vulnerabilidad intrínseca mediante un análisis de proporción de áreas ocupadas por las diferentes clases de vulnerabilidad donde los diferentes Niveles de Fondo Químico Natural (NBL) son superados. Debido a que el NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} y Cl^- son indicadores satisfactorios de contaminación ambiental, las áreas donde se superan los NBL deberían coincidir con las áreas clasificadas con una alta vulnerabilidad.

La Mesa de los Santos (Departamento de Santander, Colombia) es una meseta elevada, localizada en la cordillera Oriental de Colombia en el Macizo de Santander, donde habitan aproximadamente 18,850 personas, entre población rural (mayoritariamente) y urbana (CNPV, 2018; CNA, 2014). Esta población sufre por escasez de agua superficial, debido a las condiciones hidroclimáticas y geomorfológicas del territorio, por lo cual, las aguas subterráneas constituyen una fuente principal de abastecimiento del recurso hídrico en la zona de estudio, donde al menos un 33% de la población la usa para su consumo (Ingeoexploraciones - CAS, 2016). En los últimos 10 años, la Mesa de los Santos ha experimentado un incremento en la demanda y en las presiones del recurso hídrico por el aumento en las actividades agroindustriales, turísticas y de la población, así como los cambios en el uso de suelo que ponen en peligro la calidad del agua subterránea (Gómez et al., 2014).

Esta investigación evalúa la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero libre y el acuífero fracturado del Miembro Superior de la Formación Los Santos, que representan el mayor potencial hidrogeológico del sector (Díaz et al., 2009). Para esto, se aplicaron los métodos

DRASTIC original y un DRASTIC Modificado, el cual incluyó el parámetro de uso de suelo como indicador de contaminación de actividades antrópicas y las características del fracturamiento (densidad y zonas con fracturas abiertas y cerradas), las cuales rigen el movimiento y almacenamiento de las aguas subterráneas y sus contaminantes. Estos métodos fueron validados a partir del establecimiento de los NBL de iones indicadores de contaminación ambiental (NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} y Cl^-).

Este trabajo corresponde a una propuesta novedosa para abordar estudios de vulnerabilidad de acuíferos silisiclásticos fracturados. En estos acuíferos, el grado de cementación de sus rocas implica una porosidad primaria despreciable y una porosidad secundaria por fracturas relevante. Este estudio es, en conocimiento de la autora, el primero en que se aplica un DRASTIC Modificado en este tipo de configuraciones hidrogeológicas, dando relevancia a las características del fracturamiento en rocas sedimentarias en relación a la densidad de las fracturas y las zonas con fracturas abiertas y cerradas, parámetro importante ya que, define las zonas y vías principales para el transporte de los contaminantes desde la superficie a la capa freática. La incorporación de este parámetro aporta mayor precisión a la evaluación de la vulnerabilidad en este tipo de acuíferos.

Así mismo, se presenta por primera vez en Colombia, la aplicación de técnicas hidroquímicas muy poco usadas en América del Sur (Lucon et al., 2018) como los NBL con fines de validación de la vulnerabilidad. Los NBL han sido ampliamente usados para caracterizar acuíferos kársticos pero, muy poco usados en acuíferos silisiclásticos, siendo útil en este tipo de configuraciones donde, sumado a los flujos rápidos de aguas subterráneas, se cuenta con una alta densidad poblacional, que aporta a las aguas subterráneas sustancias químicas adversas, producto de actividades antropogénicas, que solo pueden diferenciarse de las sustancias derivadas de fuentes geogénicas mediante la definición de los NBL.

De esta manera, esta investigación busca generar conocimiento que ayude a garantizar la sostenibilidad a largo plazo del recurso hídrico subterráneo, un recurso ampliamente disponible pero vulnerable que necesita ser utilizado y gestionado de manera adecuada si se desea alcanzar los objetivos de Desarrollo Sostenible para el 2030 (UNESCO, 2022).

1. Formulación del Problema

El agua es un bien social, escaso y vital para el desarrollo y la sobrevivencia tanto de las poblaciones humanas como de la biodiversidad, y aunque en la tierra está ampliamente distribuida, nos enfrentamos a una grave “crisis del agua” que está empeorando y continuará haciéndolo, a no ser que se emprenda una acción correctiva (UNESCO, 2022).

La Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH) surge como respuesta a dicha crisis, siendo un *“proceso que promueve la gestión y el desarrollo coordinado del agua, el suelo y los otros recursos relacionados, con el fin de maximizar los resultados económicos y el bienestar social de forma equitativa sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales”* (GWP, 2011) haciéndose explícito en políticas nacionales para la gestión del agua a nivel global (MAVDT, 2010).

La Política Nacional Colombiana de la GIRH surge de lo establecido en el Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2006-2010. A partir de esta política, en el 2012 se formuló el Programa Nacional de Aguas Subterráneas (PNASUB), en el cual se plantean las acciones y estrategias en los niveles nacional y regional para la gestión y evaluación integrada de las aguas subterráneas para el país. El PNASUB establece la formulación e implementación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos (PMAA), a través de los cuales se aborda el conocimiento del sistema acuífero, su evaluación en cantidad y calidad y la identificación de la problemática o amenazas sobre el mismo (MADS, 2014).

En la etapa de diagnóstico de los Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos (PMAA), se realiza el análisis de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos. Autores como Gogu & Dassargues (2000) y Zwahlen (2004) diferencian entre vulnerabilidad intrínseca y específica,

siendo la vulnerabilidad intrínseca la susceptibilidad del agua subterránea a la contaminación generada por actividad humana en función de las características geológicas e hidrogeológicas de un acuífero pero independiente de la naturaleza de los contaminantes, y la vulnerabilidad específica la susceptibilidad del agua subterránea a un contaminante o grupo de contaminantes en concreto, en función de las características de dichos contaminantes y sus relaciones con los componentes de la vulnerabilidad intrínseca.

El resultado obtenido de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos es un mapa que constituye una herramienta esencial mediante la cual las autoridades ambientales pueden establecer medidas de manejo para la protección de las aguas subterráneas, tales como definición de áreas para estudios a escalas detalladas, densificación de las redes de monitoreo de calidad de agua, imposición de mayores frecuencias de monitoreo o aumento de parámetros de control de calidad, condicionamiento/ restricción o prohibición de nuevas actividades que impliquen manejo de sustancias altamente contaminantes (MADS, 2014).

A través de la revisión de literatura, se encontró que los métodos originales para el estudio de vulnerabilidad de los acuíferos excluyen parámetros significativos en la susceptibilidad a la contaminación del agua subterránea como el uso de suelo, parámetro importante ya que no sólo define las zonas donde se pueden originar contaminantes por actividad antropogénica (Sener & Davraz, 2013), sino además, permite identificar zonas donde se realizan actividades de agricultura como operaciones de labranza que mejoran el movimiento de agua, y por tanto, de contaminantes hacia los acuíferos subyacentes a través de la zona vadosa (Jenifer & Jha, 2018).

Adicionalmente, hasta el momento los estudios de vulnerabilidad de acuíferos prestan atención a las características del fracturamiento en rocas cristalinas y carbonatadas, obviando la influencia del fracturamiento en rocas sedimentarias silisiclásticas que, según Gellasch et al.

(2013) y Runkel et al. (2006), pueden dominar el flujo intergranular incluso en areniscas de grano grueso altamente permeables, configurando vías principales que aceleran el flujo del agua subterránea y el movimiento de los contaminantes desde la superficie a las capas freáticas (Jenifer & Jha, 2018).

Un reto asociado a la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca es la disparidad de resultados que entregan los diversos métodos disponibles, aun al ser aplicados en la misma zona de estudio. Por esta razón, se requiere desarrollar un proceso de validación que permita evaluar la veracidad de los resultados. Dicha validación puede realizarse de manera integral por medio de la identificación de Niveles de Fondo Químico Naturales (NBL). La identificación de los NBL consiste en analizar estadísticamente las concentraciones químicas de los iones en las aguas subterráneas y establecer una base para determinar si el comportamiento de la calidad del agua está asociado a la interacción con fuentes naturales o al impacto de las actividades humanas (Awawdeh et al., 2020; He et al., 2019; Rufino et al., 2019).

La Mesa de los Santos, en el departamento de Santander (Colombia), corresponde a una zona con escasez hídrica con un aumento demográfico alto en los últimos años. Su principal fuente de abastecimiento son las aguas subterráneas, las cuales se ven amenazadas por el urbanismo, la producción agrícola y pecuaria, pozos sépticos en mal estado, mal manejo de aguas residuales y basuras y la explotación de pozos ilegales. Lo anterior, combinado con ausencia de un estudio adecuado de la vulnerabilidad a su contaminación, pone en riesgo el sistema acuífero de abastecimiento de agua para consumo y actividades diarias de sus habitantes (Gómez et al., 2014).

Con el contexto anterior, el presente trabajo de investigación analiza la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del Sistema Acuífero del Miembro Superior de la Formación Los Santos. Para esto, se comparan dos metodologías (DRASTIC original y DRASTIC Modificado),

y se realiza una validación integral de ambos métodos a partir del establecimiento de los NBL para iones indicadores de contaminación, NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} y Cl^- . La investigación busca responder las siguientes preguntas: ¿Qué tan vulnerable a la contaminación es el Sistema Acuífero que se alberga en el Miembro Superior de la Formación Los Santos? ¿Qué método de evaluación de vulnerabilidad se adapta mejor al contexto de estudio? ¿Cuáles son las zonas de protección y monitoreo que permitirán una adecuada gestión del recurso hídrico subterráneo?

2. Justificación

La contaminación del agua subterránea genera impactos a largo plazo que son irreparables (Chamanehpour et al., 2020). Conocer la distribución espacial de la vulnerabilidad a la contaminación de un sistema de aguas subterráneas es un insumo útil para ayudar a la toma de decisiones desde el nivel local al regional, ya que estas herramientas son útiles para definir estrategias relacionadas con el uso del suelo, la planificación del desarrollo sostenible, identificación de áreas sensibles, priorización de áreas para mayor monitoreo o protección y educación del público en general (Aragão et al., 2020; Duhalde et al., 2018).

Existe una variedad de métodos para la estimación de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, cada método tiene ciertas ventajas sobre un contexto hidrogeológico específico, pudiendo mejorar si se adicionan factores reconocidos como únicos o representativos en la zona de aplicación, donde, los factores de tipo antropogénico como el uso de suelo, tienen un impacto importante y más realista sobre la vulnerabilidad (Machiwal et al., 2018; Sener & Davraz, 2013).

Los métodos que se usan ampliamente para la estimación de la vulnerabilidad a la contaminación en formaciones subterráneas porosas no abordan adecuadamente la evaluación de la vulnerabilidad en sistemas acuíferos silisiclásticos fracturados, por lo cual, métodos usados en acuíferos de medios porosos como DRASTIC se han modificado para evaluar la vulnerabilidad en sistemas de acuíferos fracturados (p. ej. Sener & Davraz, 2013). Por lo tanto, el uso de métodos tradicionales (DRASTIC) junto a métodos nuevos o modificados (DRASTIC Modificado) permite comparar metodologías, reduciendo los errores que acarrea estudiar sistemas acuíferos complejos (Agudelo et al., 2020; Machiwal et al., 2018).

El proceso para confirmar que un procedimiento utilizado para una prueba o método es adecuado para su uso previsto se conoce como validación, y debe constituir un paso indispensable en el marco de la evaluación de la vulnerabilidad (Machiwal et al., 2018). Los Niveles de Fondo Químico Natural (NBL), que corresponde a las concentraciones de un determinado elemento, especie o sustancia química presente en solución y que se deriva de fuentes naturales (geológicas, biológicas o atmosféricas) juega un papel fundamental para evaluar cuantitativamente si existe o no contaminación antrópica, permitiendo de manera adicional, validar los modelos de vulnerabilidad (Aragão et al., 2020; Ossa & Betancurt, 2018).

Este trabajo se desarrolló en la Mesa de los Santos, una meseta situada en la Cordillera Oriental de Colombia en el Macizo de Santander, un sector caracterizado por un clima templado (pocas lluvias), con pocos espejos de agua o fuentes superficiales, donde el recurso hídrico subterráneo, localizado en las rocas silisiclásticas fracturadas de la Formación los Santos, es la principal fuente de abastecimiento y donde el creciente urbanismo induce a la contaminación de este recurso (Becerra & Parra, 2016; Gómez et al., 2014).

Pinto et al., (2007) identificaron en la zona de la Mesa 7 áreas de interés hidrogeológico a partir de la caracterización geológica. Estos autores propusieron en 2009, un modelo hidrogeológico preliminar apoyado en el análisis de los datos cartográficos, estructurales, hidrogeoquímicos, geofísicos y el procesamiento de datos del inventario de puntos de agua en épocas de alta y baja precipitación.

Adicionalmente, la Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS) junto a la empresa Ingeoexploraciones SAS presentaron para el año 2016 un informe de la segunda fase del establecimiento de un PMAA en el sector de la Mesa. Este PMAA incluye un análisis de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación mediante la metodología GOD (Ingeoexploraciones

- CAS, 2016). Sin embargo, el método GOD no es recomendable para esta zona de estudio, dada su complejidad hidrogeológica. Además, la escala de análisis fue poco detallada, los insumos usados son de poca confiabilidad y los resultados planteados no permiten visualizar la localización de lo que este estudio consideró como “sectores definidos” de vulnerabilidad ya que carecen de mapas.

Aunque los trabajos mencionados son avances hacia la protección y manejo eficiente del recurso hídrico, la zona de estudio aún adolece de un análisis apropiado de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, donde se considere, además de la implementación de métodos comparativos, factores importantes en el análisis de vulnerabilidad a la contaminación en acuíferos silisiclásticos fracturados con alta densidad poblacional como lo es el uso de suelo y las características del fracturamiento (densidad y zonas con fracturas abiertas o cerradas). Adicionalmente, es necesario implementar una validación integral de los métodos aplicados.

Este estudio implementa la comparación de metodologías de vulnerabilidad intrínseca y su validación mediante el establecimiento de NBL. El establecimiento de NBL en estudios de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos ha sido ampliamente usado en la Unión Europea para caracterizar acuíferos kársticos (Aragão et al., 2020) y en general, ha sido poco usados para caracterizar acuíferos silisiclásticos. Adicionalmente, según conocimiento de la autora, en Colombia esto no ha tenido mayor desarrollo. De esta manera, este estudio contribuye al desarrollo de una metodología de evaluación integral de la vulnerabilidad de los sistemas acuíferos silisiclásticos fracturados.

3. Revisión Bibliográfica

Esta sección engloba tanto el marco teórico como el estado del arte de los temas principales tratados en esta investigación, los cuales son la vulnerabilidad, los métodos de evaluación de la vulnerabilidad, la validación y el NBL.

3.1 Marco Teórico

En este marco teórico se sintetiza el término "vulnerabilidad" en el contexto de la contaminación de acuíferos, se describen los distintos métodos utilizados para estimar la vulnerabilidad, prestando especial atención a los métodos DRASTIC y DRASTIC Modificado. Además, se define el proceso de validación de la vulnerabilidad y se explica el concepto de NBL.

3.1.1 Vulnerabilidad a la contaminación

El término vulnerabilidad fue aplicado por primera vez a las aguas subterráneas por Margat (1968) y luego adoptado en todo el mundo (MAVDT, 2010), aunque con diferentes significados. Foster en 1987 propuso una definición útil y consistente, considerando la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero como aquellas características intrínsecas de los estratos que separan la zona saturada del acuífero de la superficie del terreno, lo cual determina su sensibilidad a ser adversamente afectado por una carga contaminante aplicada en superficie (Foster et al., 2002).

Aunque no existe una definición internacionalmente aceptada de vulnerabilidad, en Colombia, la modificación del Decreto 1729 de 2002 la define como “Características propias de un acuífero que determinan la sensibilidad del mismo a ser afectado por contaminación derivada de actividades antrópicas o fenómenos naturales” (MAVDT, 2010).

Autores como Gogu & Dassargues (2000) y Zwahlen (2004) distinguen entre vulnerabilidades intrínseca y específica. La vulnerabilidad intrínseca se define como una propiedad general, no medible y sin dimensión, que hace referencia a la susceptibilidad del agua subterránea a la contaminación generada por actividad humana en función de las características geológicas e hidrogeológicas de un acuífero, pero independiente de la naturaleza de los contaminantes. La vulnerabilidad específica se define como la susceptibilidad del agua subterránea a un contaminante o grupo de contaminantes en concreto, en función de las características de éstos y sus relaciones con los componentes de la vulnerabilidad intrínseca.

Según el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Colombiano, la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación se analiza a través de evaluación de tres factores, principalmente: 1) la capacidad de atenuación de la carga contaminante que ocurre en el suelo, en la zona no saturada y en la zona saturada; 2) la resistencia o la inaccesibilidad en el sentido hidráulico a la penetración de los contaminantes; y 3) los factores externos que puedan facilitar o retardar el impacto de las cargas contaminantes, como la pendiente del terreno y la recarga del acuífero (MAVDT, 2010).

3.1.2 Métodos para la evaluación de la vulnerabilidad

Existe diversidad de métodos que permiten evaluar la vulnerabilidad del agua subterránea y que se pueden dividir en dos grupos básicos: 1) Los métodos numéricos que pueden predecir la propagación de contaminantes en un área específica. 2) Los métodos de superposición que se basan en parámetros y pesos. En ambas tipologías, la salida representa el mapa de vulnerabilidad de la zona (Chamanehpour et al., 2020).

Los métodos de superposición, también llamados métodos paramétricos, corresponden a métodos cualitativos, son comparativamente más simples y proporcionan un buen equilibrio entre las dificultades de adquisición de datos y la confiabilidad de la mayoría de sus resultados. Estos métodos son ampliamente utilizados para el cálculo de vulnerabilidad intrínseca y se han venido desarrollando desde los años 80 hasta la actualidad. Entre los métodos clásicos tenemos: DRASTIC, GOD, AVI, SINTACS, EPIK, sin contar algunas de sus versiones más recientes, como PI y COP que son consideradas las versiones modernas del EPIK (Petrović, 2020). Estos métodos son agrupados según su metodología en: métodos de matriz, que utilizan parámetros muy seleccionados y por tanto su aplicabilidad es local; métodos de puntuación (RS), en los que cada parámetro está dividido en clases a las que atribuye su puntuación (p. ej. GOD); los métodos de puntuación y ponderación (PCSM), en los que además de asignar una puntuación, cada parámetro es multiplicado por un factor ponderador (p. ej. DRASTIC); y los métodos de relaciones analógicas (AR). De todos estos, se destacan los RS y PCSM.

La selección del método a usar se hace en función de las características del acuífero y la información disponible en el sitio de aplicación (Aragão et al., 2020; Awawdeh et al., 2020; E Chamanehpour et al., 2020; Jaunat et al., 2019).

Aunque estos métodos funcionan de manera general, presentan claras limitaciones derivadas principalmente de la subjetividad, denotándolos como conceptuales y ambiguos (Lisboa et al., 2020). Una de las principales ventajas del DRASTIC en relación con otros modelos corresponde a la evaluación de la vulnerabilidad utilizando varios criterios de información, ajustándose muy bien a diversas condiciones de estudio y permitiendo así una mejor evaluación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de acuíferos (Agudelo et al., 2020; Machiwal et al., 2018).

Método DRASTIC

El método DRASTIC fue desarrollado por Aller *et al.* en los 80 para la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Según Alvarado (2000), el índice DRASTIC se basa en las siguientes hipótesis: El contaminante viaja desde la superficie del terreno y penetra durante la recarga, el contaminante tiene la misma movilidad del agua, el método es aplicable a regiones donde el área a evaluar es mayor o igual a 45 Ha.

Este método se basa en la identificación de los ambientes hidrogeológicos y en el establecimiento de la vulnerabilidad de acuíferos detríticos libres con base en un sistema jerárquico numérico de los elementos que componen el acrónimo de sus siglas en inglés, así:

D – Depth wáter table. Profundidad del nivel freático bajo la superficie del terreno. Este es un factor importante porque determina la profundidad de los materiales a través de los cuales deben pasar los contaminantes antes de llegar al nivel freático. También afecta el tiempo disponible para que la contaminación sufra reacciones químicas y biológicas como dispersión, oxidación, atenuación natural, sorción, etc. (Ckakraorty *et al.*, 2007). Por lo tanto, cuanto mayor sea la profundidad del nivel freático, menor será la posibilidad de que los contaminantes lleguen al nivel freático y mayor será la posibilidad de que los contaminantes se atenúen (Sener & Davraz, 2013).

R – Net Recharge. Recarga Neta. Es la cantidad de agua anual por unidad de superficie que contribuye a la alimentación de un acuífero (MAVDT, 2010). La principal fuente de recarga de aguas subterráneas es la lluvia y, por lo tanto, sirve como el principal agente de transporte de contaminantes. Junto con la lluvia, la filtración de las fuentes de agua superficial y el flujo de retorno del riego también contribuyen a la recarga neta del acuífero (Sinha *et al.*, 2016). Según Aller *et al.* (1985), más recarga implica más posibilidades de vulnerabilidad de las aguas

subterráneas. Por lo tanto, la recarga neta de cualquier región se considera como el otro factor que influye en la vulnerabilidad de las aguas subterráneas (Saranya & Saravanan, 2022).

A – Acuífer media. Litología y estructura del medio acuífero. Representa las características del acuífero, en particular la capacidad del medio poroso y/o fracturado para transmitir los contaminantes (MAVDT, 2010). Según Aller et al. (1985), es el medio el que controla la magnitud del contaminante que llega al nivel freático (Saranya & Saravanan, 2022).

S – Media Soil. Tipo de Suelo. Representa la capacidad de los suelos para oponerse a la movilización de los contaminantes y corresponde a la parte de la zona vadosa o no saturada que se caracteriza por la actividad biológica. En conjunto con el parámetro A, determina la cantidad de agua de percolación que alcanza la superficie freática (MAVDT, 2010). A mayor tasa de infiltración o permeabilidad del suelo, mayor probabilidad de contaminarse (Saranya & Saravanan, 2022; Bartzas et al., 2015).

T – Topography. Topografía del terreno. Representa la pendiente de la superficie topográfica e influye en la evacuación de aguas contaminantes por escorrentía superficial y subsuperficial (MAVDT, 2010). Cuanto más empinado sea el terreno, menos vulnerable será la región y, de manera similar, cuanto más plano sea el terreno más tiempo para la infiltración; por lo tanto, la región es más vulnerable a la contaminación (Saranya & Saravanan, 2022; Shekhar et al., 2014).

I – Impact of vadose zone. Impacto en la zona no saturada o vadosa. El medio no saturado debajo de la superficie del suelo, que tiene una gran importancia por razones hidrológicas, se conoce como zona vadosa (Saranya & Saravanan, 2022). Tiene un impacto significativo en la ocurrencia y el movimiento de las aguas subterráneas, siendo considerada como la zona donde ocurre la atenuación natural de los contaminantes del agua subterránea antes de que lleguen al

nivel freático (Sener et al., 2009). Representa, por tanto, la capacidad del suelo para obstaculizar el transporte vertical (MAVDT, 2010).

C – Hydraulic Conductivity. Conductividad Hidráulica. Determina la cantidad de agua que atraviesa el acuífero por unidad de tiempo y por unidad de sección, es decir, la velocidad. (MAVDT, 2010).

Cada uno de los anteriores factores tiene una importancia o peso relativo (w) que varía de 1 a 5. De acuerdo con las características y el comportamiento, a cada variable de parámetro se les asignan tasas (r) que van desde 1 hasta 10. La combinación de pesos y tasas determinan un valor numérico adimensional, llamado índice DRASTIC (ID), el cual se obtiene como indica la ecuación 1.

$$ID = D_w D_r + R_w R_r + A_w A_r + S_w S_r + T_w T_r + I_w I_r + C_w C_r \quad (1)$$

Este ID puede variar entre 23 (vulnerabilidad mínima) y 230 (vulnerabilidad máxima) indicando 5 clases de vulnerabilidad como se especifica en la Tabla 1 (MAVDT, 2010).

Tabla 1

Categorías de vulnerabilidad del Método DRASTIC.

Categorías DRASTIC	Valores límites de los intervalos	
Muy Bajo	23	64
Bajo	64	105
Moderado	105	146
Alto	146	187
Muy Alto	187	230

Adaptado de: MAVDT, (2010)

Método DRASTIC Modificado

DRASTIC Modificado surge de ajustes a las escalas de valoración de los parámetros o de la inclusión o supresión de un parámetro del DRASTIC original con el fin de mejorar los resultados obtenidos mediante el análisis de vulnerabilidad (Agudelo et al., 2020).

Los parámetros que comúnmente se adicionan al DRASTIC original son uso de suelo, coberturas de suelos, densidad de lineamientos, distancia a lineamientos y altitud (Agudelo et al., 2020; Awawdeh et al., 2020; Chamanehpour et al., 2020; Jones et al., 2019; Rufino et al., 2019; Entezari et al., 2016). Según Canora & Sdao (2020) y Petrović (2020), el uso de la mayor cantidad de datos posibles sobre el área de estudio, acompañado de control de campo de forma directa e indirecta, mejora los mapas de vulnerabilidad. Para obtener el índice de vulnerabilidad de los métodos modificados, se sigue la ecuación general 2:

$$IDM = \sum_{i=1}^n (w_i \times r_i) \quad (2)$$

Donde *IDM* es el índice DRASTIC Modificado, *n* es el número de parámetros a evaluar, *w* es el peso asignado al parámetro y *r* es la clasificación dada a cada característica establecida para el parámetro en cuestión (de Souza et al., 2022). Los rangos de cada categoría de vulnerabilidad del método modificado dependerán del número de parámetros tenidos en cuenta por el mismo y las escalas de valoración asignadas por los investigadores.

3.1.3 Validación de la vulnerabilidad

De manera general, la validación es un proceso que permite verificar la idoneidad de un procedimiento o método aplicado. Debido a que las evaluaciones de vulnerabilidad mediante

diferentes métodos cualitativos muestran patrones variables que pueden tener similitudes y/o contradicciones, haciendo baja su confiabilidad, se hace indispensable evaluarlos o validarlos, generando así una mayor certeza de los resultados obtenidos en una investigación (Sekar et al., 2023; Machiwal et al., 2018; Neukum et al., 2008). Dado que los métodos cualitativos carecen de base física y son de naturaleza paramétrica, no se dispone de un método general para validar los mapas de vulnerabilidad obtenidos (Goldscheider et al., 2001). Por esta razón, los investigadores utilizan los métodos que consideran más apropiados en función del uso previsto del agua y de la disponibilidad de datos sobre las fuentes de contaminación predominante en el sector (Sekar et al., 2023). Algunos investigadores han validado los resultados de los métodos paramétricos que evalúan vulnerabilidad mediante pruebas de trazadores (p. ej. Jiang et al., 2014; Ravbar & Goldscheider, 2007), comparando e integrando los resultados de múltiples métodos cualitativos o cuantitativos (p. ej. Kazakis et al., 2018), o evaluando la relación entre el índice de vulnerabilidad y la concentración de elementos prominentes de la calidad del agua subterránea relacionados con las actividades antrópicas que se realizan en el sector de estudio. La evaluación se mide utilizando de manera general técnicas estadísticas, como el coeficiente de correlación y el coeficiente de determinación de elementos (Awawdeh et al., 2020; He et al., 2019; Rufino et al., 2019).

3.1.4 Niveles de Fondo Químico Natural (NBL)

El NBL, por sus siglas en inglés (Natural Background Level), también es conocido como línea base, concentración de fondo químico natural o fondo químico natural del agua subterránea. El NBL es la concentración de un determinado elemento, especie o sustancia química presente en solución que es derivada de fuentes naturales como las geológicas, biológicas o atmosféricas (Edmunds et al., 2003). Ossa & Betancurt (2018) aclaran que estas concentraciones deben

presentarse como un rango y no como un solo valor, y que además, deben ser consideradas para un sistema específico. Para Hernández & Custodio (2004) el NBL del agua subterránea representa aguas puras sin ninguna traza del impacto humano.

El NBL de las aguas subterráneas está controlado por numerosos factores que interactúan, incluyendo la geología, el clima, el tiempo de residencia, el espesor del suelo y los sedimentos superficiales, interacciones con otros cuerpos de agua y procesos químicos y biológicos en la zona vadosa (Edmunds & Shand, 2008; Shand et al., 2007).

BRIDGE (2006) propone tres enfoques para la derivación del NBL, cada uno de ellos basado en un nivel diferente de conocimiento geoquímico de masas de agua subterránea (bajo, medio y alto). Estadísticamente, el valor de NBL se puede establecer según el tipo de distribución (p. ej. media + 2σ , mediana, percentiles) o identificando puntos de discontinuidad en la curva de frecuencia acumulada para su química principal: contenido en K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- donde se pueden incluir los parámetros de interés (ISPRA, 2009).

El estudio para la determinación de los NBL debe presentar el número máximo de descriptores numéricos y gráficos, a fin de brindar un panorama completo de la distribución de los datos que pueda sustentar la selección del valor a utilizar en el proceso de toma de decisiones (APAT-ISS, 2006).

Aragão et al. (2020) adoptan la definición de este concepto y realizan el análisis de fondos naturales de cloruro (Cl^-), nitrato (NO_3^-), sulfato (SO_4^{2-}) y fosfatos (PO_4^{3-}) para validación de vulnerabilidad intrínseca. Estos iones son considerados indicadores satisfactorios de polución y contaminación ambiental, mostrando la definición de NBL como un factor fundamental no solo para comprender la hidroquímica de la región estudiada, sino para realizar validación, ya que la

distinción entre orígenes antropogénicos y geogénicos de un parámetro solo puede realizarse mediante la definición de valores de fondo químico natural.

3.2 Estado del Arte

En este apartado se muestra la evolución del término vulnerabilidad y se enlistan los principales enfoques de los últimos estudios con las diferentes técnicas usadas para sus validaciones. Así mismo, se presentan algunas investigaciones de vulnerabilidad que han aplicado el método DRASTIC original y la evolución de sus modificaciones. Finalmente se presentan los últimos estudios de aguas subterráneas que han usado los NBL y sus principales enfoques.

3.2.1 Vulnerabilidad

En hidrogeología, el término vulnerabilidad de acuíferos se comenzó a usar de manera intuitiva a partir de la década de los años 70 en Francia por Albinet y Margat, como “*El medio físico protege al acuífero de contaminantes que pueden infiltrarse desde la superficie*” (Rueda, 2006). Luego, la vulnerabilidad es ampliamente descrita en los 80 por Haertle, Aller, Foster e Hirata (Foster et al., 2002) y posteriormente ha venido tomando diversos conceptos, calificaciones y se han desarrollado diversas metodologías de evaluación orientadas, en la mayoría de los casos a su representación cartográfica.

Algunos conceptos sobre vulnerabilidad y su aplicabilidad son recopilados por Auge (2004), donde destacan las siguientes percepciones:

Foster (1987) considera la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación como aquellas características intrínsecas de los estratos que separan la zona saturada del acuífero de la superficie

del terreno, lo cual determina su sensibilidad a ser adversamente afectado por una carga contaminante de origen artificial aplicado en superficie.

En 1991, la EPA incorpora a la definición, además de las condiciones del medio, las propiedades del contaminante y las prácticas de cultivo, concepto que se caracteriza como vulnerabilidad específica.

En 1994, Vrba y Zaporozec definen la vulnerabilidad como “una propiedad intrínseca del sistema de agua subterránea que depende de la sensibilidad de este a impactos humanos y/o naturales”, incluyendo así a la definición contaminantes de origen tanto artificial como natural, concepto con el cual concuerda Custodio (1995).

Martínez et al. (1998) añaden que, la evaluación de la vulnerabilidad debe realizarse admitiendo que es un proceso dinámico (cambiante con la actividad realizada) e iterativo (cambiante en función de las medidas protectoras). En este mismo año, Navas et al. (1998) añaden que el concepto de vulnerabilidad no se define como una propiedad absoluta, sino como un valor relativo de unas clases de vulnerabilidad con respecto a otras.

Muchos otros autores y entidades han hecho aportes al concepto (Lobo, 1997; Espinoza y Ramírez, 2002), sin embargo, hasta la fecha no se ha logrado un consenso sobre el alcance del término, existiendo actualmente dos grandes corrientes. La primera, representada por aquellos investigadores que consideran la vulnerabilidad como una propiedad referida exclusivamente al medio y que por tanto se refieren a una vulnerabilidad intrínseca, natural o integrada. La segunda, representada por aquellos que, además del comportamiento del medio, otorgan trascendencia al tipo y propiedades de las cargas contaminantes, enfocándose más en una vulnerabilidad específica.

En años recientes, los estudios de vulnerabilidad en acuíferos han abarcado la diversidad de regiones climáticas del mundo como áridas, semiáridas, húmedas tropicales, las regiones

subtropicales y templadas (Sekar et al., 2023). La evaluación también ha sido reportada en varios ambientes hidrogeológicos, es decir, acuíferos kársticos (Batllori & Canto, 2022; Nekkoub et al., 2020; Jiménez et al., 2019; Popescu et al., 2019; Yang et al., 2019; Hamamin & Nadiri, 2018; Kazakis et al., 2018; Nanou & Zagana, 2018; János et al., 2017; Tayer & Velásques, 2017), regiones costeras (Guo et al., 2023; Sekar et al., 2023; Taghavi et al., 2023; Aneesh et al., 2022; Ouzerbane et al., 2022; Baalousha et al., 2021; Phok et al., 2021; Canora & Sdao, 2020), acuíferos aluviales (Taheri et al., 2023; Nkembe & Defo, 2022; Khakhar et al., 2021; Jaunat et al., 2019) y acuíferos de roca dura (Jenifer & Jha, 2018; Kumar, 2012). El estudio de la vulnerabilidad se ha enfocado en zonas donde el recurso subterráneo es clave para el abastecimiento de las poblaciones (Satouh et al., 2021), pero, donde se ve adversamente afectado por actividades antropogénicas asociado al cambio de uso de las tierras (Taghavi et al., 2023; Byeranvand & Afzali, 2022; Etuk et al., 2022; Salman et al., 2019), la amplia urbanización e industrialización (Fiori et al., 2023; Nkembe & Defo, 2022; Canora & Sdao, 2020).

Los métodos aplicados generalmente se soportan en plataformas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Maleki et al., 2023; Ouzerbane et al., 2022; Elmeknassi et al., 2021; Rahman et al., 2021), predominando el uso del método DRASTIC (Aneesh et al., 2022; Bouselsal & Ouarekh, 2021; Ouzerbane et al., 2022; Rahman et al., 2021) y sus formas modificadas (Maleki et al., 2023; Balaji et al., 2021; Norouzi et al., 2021; Wei et al., 2021; Asfaw & Mengistu, 2020; Alam et al., 2014), seguido por GOD (Rubiantoro & Gari Amrina, 2020; Sekar et al., 2023), SINTACTS (Jesudhas et al., 2021; Busico et al., 2017) y EPIK (Nekkoub et al., 2020).

Algunos de los estudios de vulnerabilidad se han enfocado en la comparación de métodos, principalmente entre DRASTIC y SINTACS (p. ej. Sahu et al., 2022; Khakhar et al., 2021) y DRASTIC y GOD (p. ej. Lasagna et al., 2018; Shrestha et al., 2017). Otros se han enfocado en la

generación de nuevos métodos, como algunos que puedan romper las barreras de la subjetividad acompañado de una gran facilidad para la preparación y procesamiento de datos y que pueda ser aplicado en cualquier tipo de acuífero como el RIVA (Vrouhakis et al., 2022; Tziritis et al., 2021) y métodos que puedan incluir los efectos del cambio climático como CC-PESTO (Stevanović et al., 2021).

Los estudios de vulnerabilidad, aunque comúnmente se abarcan por cuencas o pequeñas regiones, se manejan en todas las escalas, incluso las continentales (Rama et al., 2022), presentado en común la búsqueda de la gestión del recurso hídrico subterráneo (Chamanehpour et al., 2020; Petrović, 2020; Kazakis et al., 2018).

3.2.2 Métodos DRASTIC Y DRASTIC Modificado

El método DRASTIC corresponde a uno de los métodos más difundidos y probablemente más utilizados a nivel internacional tanto para la evaluación cualitativa de la vulnerabilidad de un acuífero como para su mapeo (Auge, 2004), destacando el desarrollo de trabajos en África, indonesia, India, Irán, Irak, Jordania, Europa y Estados Unidos (Patel et al., 2022). Estudios previos han indicado que la evaluación de la vulnerabilidad usando el método DRASTIC a través de los SIG, produce resultados confiables (Mensah et al., 2023; Bera et al., 2022; Chakraborty et al., 2022; Yu et al., 2022; Patel et al., 2022; Ghosh et al., 2021; Shakoore et al., 2020; Bhuvaneshwaran & Ganesh, 2019).

En los últimos años, se han realizado extensas investigaciones para mejorar la compatibilidad del método DRASTIC con las áreas de estudio, por lo cual aparecen los métodos DRASTIC Modificados, los cuales asignan nuevos valores a los rangos de clasificación, pesos

relativos y clases de vulnerabilidad, eliminan algunos de sus parámetros o consideran nuevos parámetros de análisis (Machiwal et al., 2018).

La adecuación del número y tipo de parámetros en DRASTIC ha sido el objeto de estudio de muchos investigadores (Kumar & Pramod, 2020; Liu et al., 2022). Algunos agregaron parámetros al método DRASTIC en función del área de estudio (Soyaslan, 2020; Kumar & Pramod Krishna, 2020; Hu et al., 2018; Sener & Davraz, 2013) y otros eliminaron algunos de los parámetros DRASTIC (Agudelo et al., 2020; Nadiri et al., 2019; Arezoomand Omid Langrudi et al., 2016).

Otros investigadores se enfocaron en modificar de manera empírica los rangos del DRASTIC original (Klug, 2009). No obstante, al cuestionar la efectividad de modificar estos rangos de manera empírica, se han implementado diversas técnicas para optimizar la asignación de tasas y pesos (Maleki et al., 2023; Saravanan et al., 2023; Gharakezloo et al., 2022; Goodarzi et al., 2022; Lahjouj et al., 2022; Samadi, 2022; Saranya & Saravanan, 2022; Yu et al., 2022; Balaji et al., 2021; Torkashvand et al., 2021; Nadiri et al., 2019; Baghapour et al., 2016; Umar et al., 2009; Ying et al., 2007; Panagopoulos et al., 2006). Las anteriores técnicas dieron origen a métodos que recibieron nombres como FUZZY-DRASTIC, AHP-DRASTIC y EBF-DRASTIC, Wilcoxon-MH-DRASTIC, VWM-DRASHCL, entre otros, los cuales, según los autores, resultaron ser más valiosos y precisos al crear un mejor ajuste entre las condiciones reales del acuífero y el índice de vulnerabilidad DRASTIC.

Actualmente, debido al crecimiento demográfico que ha venido de la mano con el cambio de los usos de suelo y la expansión de la frontera agrícola junto al descubrimiento de las fallas como generadores de lineamientos que pueden controlar el movimiento de aguas subterráneas, investigadores como Jenifer & Jha (2018), Chamanepour et al. (2020) y Saranya & Saravanan

(2022) empiezan a incluir en el método DRASTIC las capas de uso de suelo (LU) y la densidad de lineamientos (LD) donde hay fuerte control estructural generando métodos conocidos como los DRASTIC-LD, DRASTIC LU, DRASTIC-LDLU. La comparación de estos métodos con el DRASTIC original ha evidenciado que el método original subestimaba en gran medida la vulnerabilidad al ignorar los impactos antropogénicos y la influencia de los lineamientos en los acuíferos y que los métodos que incluían tanto LU como LD eran más aptos para este tipo de estudios (Jenifer & Jha, 2018).

3.2.3 Validación de la vulnerabilidad

Aun no existe un modelo específico para la validación de los mapas de vulnerabilidad. Sin embargo, la mayoría de los investigadores validan estos mapas usando las concentraciones de los nitratos (Shrestha et al., 2017), ya que es el principal contaminante presente en las aguas producto de las actividades antrópicas. La concentración máxima aceptable de nitrato (NO_3^-) para el agua potable es de 50 mg/L según la OMS (2011).

Para validar con nitratos, los investigadores han aplicado índices de correlación (Norouzi et al., 2021; Satouh et al., 2021; Wei et al., 2021), correlación de Pearson (Balaji et al., 2021), análisis de distribución espacial (Tziritis et al., 2021) e incluso, superposición del mapa de vulnerabilidad con el de distribución del nitrato (Bouselsal & Ouarekh, 2021).

Algunos estudios consideran que la validación a partir de un solo parámetro químico no es una forma legítima de demostrar que un determinado acuífero es vulnerable, por lo cual, realizan análisis estadísticos de correlación de múltiples posibles contaminantes químicos, considerando la combinación de dos o tres variables, como el análisis de nitratos junto a la presencia de microbios

(Asfaw & Mengistu, 2020), nitratos y conductividad eléctrica (Elmeknassi et al., 2021; Sekar et al., 2023) o nitrato, conductividad eléctrica y cromo (Hasan et al., 2019).

Otros investigadores se enfocan en los parámetros de calidad del agua, que involucran la combinación de diferentes variables como los sólidos disueltos totales (SDT), cloruros, sulfatos, bicarbonatos entre otros que se comparan con los índices de vulnerabilidad del método aplicado (Jesudhas et al., 2021).

También se han considerado los índices de absorción de sodio (SAR) en lugares donde se desea utilizar el agua subterránea como insumo para riego de cultivos, ya que los contenidos de sales son determinantes para la calidad del agua de riego (Rufino et al., 2019). Kong et al. (2019) proponen el uso de dos conjuntos de índices de Nemerow, los cuales integran ocho parámetros de contaminación en el agua subterránea (pH, cloruro, sulfato, nitrato, nitrito, sólidos disueltos total, dureza total y demanda química de oxígeno) proporcionando evaluaciones integradas de la calidad del agua en lugar de evaluaciones específicas de contaminación como el nitrato.

Recientemente, se han adoptado los NBL no solo para la caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas sino como herramienta de validación de vulnerabilidad a la contaminación (Aragão et al., 2020).

3.2.4 Niveles de Fondo Químico Natural (NBL)

La determinación del NBL suscitó un enorme interés en Europa entre los Estados miembros y la comunidad científica (Preziosi et al., 2010). Ya se han presentado numerosos estudios de casos sobre NBL, así como ejemplos metodológicos (p. ej. Sellerino et al., 2019; Ducci et al., 2016; Cruz & Andrade, 2015; Vencelides et al., 2010; Hinsby et al., 2008; Marandi & Karro, 2008; Nieto et al., 2005). Los diferentes enfoques metodológicos para la evaluación del NBL de las aguas

subterráneas se atribuyen en gran medida a las funciones de distribución de probabilidad (Wendland et al., 2008; De Caro et al., 2017; Panno et al., 2006; Edmunds et al., 2003). De los enfoques existentes para determinar NBL, dos han sido ampliamente utilizados, la estadística (Bi et al., 2022; Gao et al., 2020; A. Molinari et al., 2019; Parrone et al., 2019) y la preselección (He et al., 2022; Zanotti et al., 2022).

Los enfoques estadísticos para determinar NBL se pueden dividir en dos subtipos: los basados en modelos y los estadísticos que se combinan con el análisis exploratorio de datos. El primero se basa en la suposición de que los datos naturales siguen una distribución teórica subyacente, y su limitación común es que la suposición no se puede verificar (Nakić et al., 2007). El segundo, se basa en el principio de que diferentes poblaciones de datos resultantes de varias fuentes geoquímicas pueden identificarse mediante el uso de herramientas gráficas (Sellerino et al., 2019; Preziosi et al., 2014; Panno et al., 2006), siendo su principal limitación una estimación subjetiva de los umbrales que dependen de la experiencia del usuario y del conocimiento del experto (Bondu et al., 2022; Reimann et al., 2005).

Por otro lado, los enfoques de preselección se basan en la extracción de muestras de aguas subterráneas afectadas por aportes antropogénicos mediante el uso de sustancias indicadoras (De Caro et al., 2017; Ducci et al., 2016; Kim et al., 2015; Molinari et al., 2012). Su principal limitación es que los criterios de selección en estos métodos suelen ser arbitrarios (Bondu et al., 2022). De manera reciente ha surgido un nuevo enfoque de preselección que consiste en indicadores de la capacidad de oxidación y las relaciones de Cl/Br frente a las concentraciones de Cl (Huang et al., 2023; Serianz et al., 2020).

Las últimas publicaciones sobre NBL han tenido como objetivo caracterizar los principales constituyentes del agua subterráneas en cuencas con acuíferos poco profundos con riesgo a

contaminación por nitratos y salinización debido a la acción antropogénica (Islam et al., 2023); evaluar los NBL de contaminantes geogénicos (GC) de As y Mn mediante el uso de la combinación de prueba Grubbs y el método de preselección con enfoque en capacidad de oxidación de Cl/Br en zonas costeras urbanizadas (Huang et al., 2023); evaluar la ocurrencia y distribución del As (Khan et al., 2023); evaluar el estado geoquímico de las masas de agua en zonas costeras que presentan un alto riesgo de salinización a través de una nueva metodología de doble preselección con límites fijos/dinámicos (Parrone et al., 2022); aplicar un enfoque sistemático basado en el esquema Khadra-Stuyfzand (KS) para establecer el NBL de acuíferos que presentan diferentes fuentes de contaminación, incluyendo la intrusión de agua salada (Khadra et al., 2022); aplicar la distribución de probabilidad de mezcla Gamma y la técnica iterativa de eliminación de valores atípicos para estimación del NBL de NO_3^- con el fin de superar los obstáculos que genera el hecho de que el NO_3^- provenga de distintas fuentes (procesos naturales y antropogénicos) (Afrifa et al., 2022); evaluar la influencia de las actividades humanas en los procesos hidrogeoquímicos, haciendo un enfoque en el NO_3^- (Manu et al., 2022; Mao et al., 2022) y en el PO_4 de zonas urbanizadas (Bi et al., 2022).

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

Evaluar la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del Sistema Acuífero del Miembro Superior de la Formación Los Santos, Santander.

4.2 Objetivos Específicos

- Identificar las principales unidades hidrogeológicas de la zona de estudio y sus características hidráulicas y texturales con fines de análisis de la vulnerabilidad.
- Analizar la evaluación de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero de interés, comparando los métodos DRASTIC y DRASTIC Modificado.
- Validar los resultados de vulnerabilidad mediante análisis estadístico del fondo químico natural del acuífero estudiado.

5. Generalidades del Área de Estudio

A continuación, se presentan las generalidades del área donde se desarrolló el proyecto de investigación, que incluye la localización de la zona, sus características fisiográficas, geológicas e hidrogeológicas.

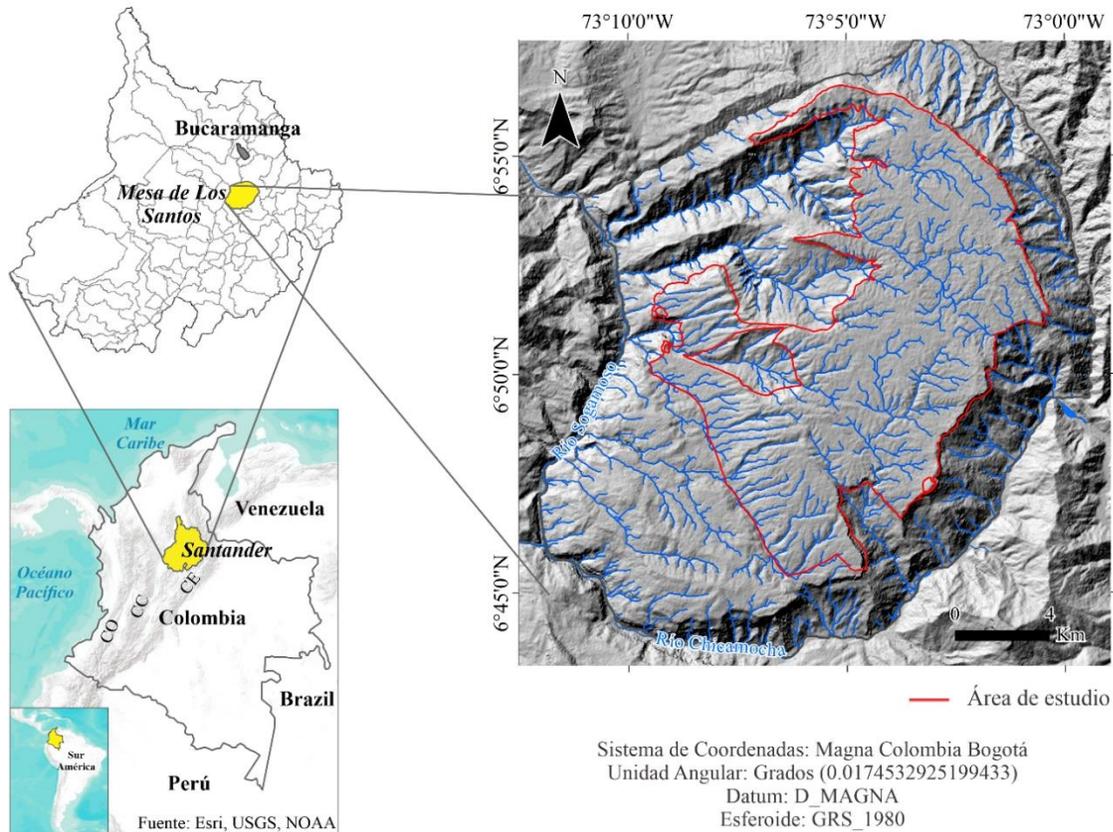
5.1 Localización y Aspectos Fisiográficos del Área de Estudio

El área de estudio se localiza en una meseta elevada de la Cordillera Oriental Colombiana (Figura 1), a 62 km de Bucaramanga (Santander); abarca 157.36 km² que incluyen 22 veredas de los municipios de Los Santos, Piedecuesta y Girón. El área de estudio presenta altitudes entre los 732 hasta los 1821 m.s.n.m., su temperatura media anual varía entre los 20°C y 26°C y la precipitación anual estimada es de 1145 mm/año, con un decrecimiento hacia el suroccidente a 863 mm/año (Becerra & Parra, 2016).

En la zona de estudio hay presencia de quebradas perennes (p. ej. Quebrada Honda) con afluentes intermitentes que abastecen las comunidades de la zona, lo que implica un fuerte descenso en épocas de sequía (poca lluvia), que pueden extenderse de 1 a 4 meses, presentando así una limitación del recurso hídrico superficial. La morfología suave, con predominio de zonas planas en el tope de la meseta favorecen la percolación del agua (Moreno y Silva, 2021). En este sentido, las aguas subterráneas constituyen una fuente importante de abastecimiento del recurso hídrico en la zona de estudio, donde al menos un 33% de la población depende de esta fuente para su consumo (Ingeoexploraciones - CAS, 2016).

Figura 1

Localización del área de estudio con referencia a Sudamérica.



*Nota. CE: Cordillera Oriental, CC: Cordillera Central, CO: Cordillera Occidental.

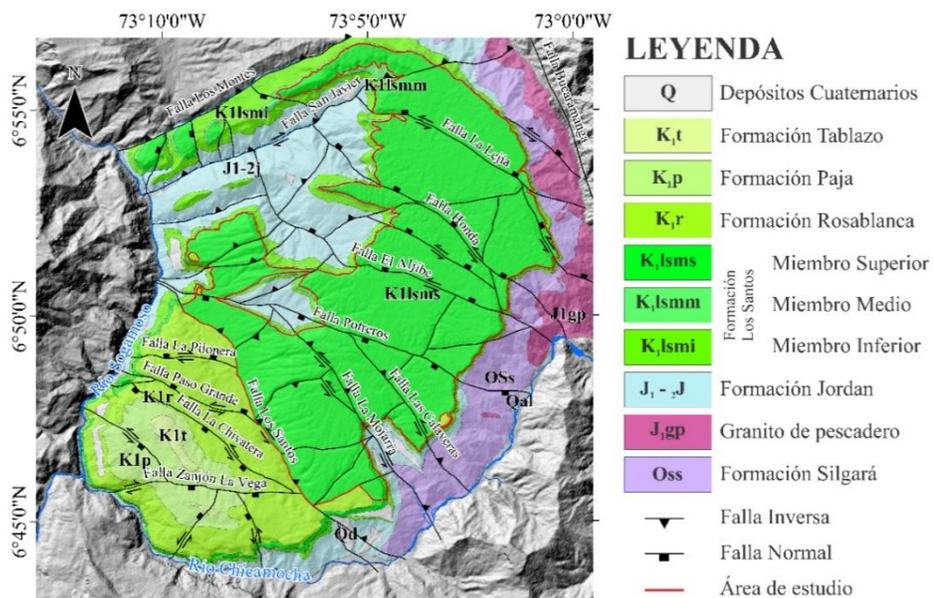
5.2 Marco Geológico

Tectónicamente, el área de estudio está influenciada por las fallas de Bucaramanga y el Suárez que delimitan un bloque en forma de cuña hundido y ligeramente inclinado hacia el oeste; su estilo estructural configura un plegamiento con anticlinales y sinclinales cortos y suaves (Hincapié y Veloza, 2009; Pinto et al., 2007). El fracturamiento en la Mesa de los Santos presenta dos direcciones preferenciales cercanas al NW-SE y NE-SW, donde las fallas con dirección NW-

SE tienen mayor continuidad y alcanzan las rocas del basamento; mientras que, las fallas con dirección NE-SW presentan continuidad limitada en trazos cortos (Tarazona Lizcano et al., 2021). El área presenta geformas de ambientes estructural, denudacional, fluvial y antropogénico, destacando hacia el norte y centro subunidades de meseta estructural y escarpes de meseta estructural; hacia el sur y suroeste las laderas estructurales de cuesta y las planicies colinadas denudadas (Moreno y Silva, 2021). En la zona de estudio afloran secuencias de rocas sedimentarias de edad Jurásica y del Cretácico Inferior que reposan sobre cuerpos ígneos y metamórficos. Dentro de la secuencia sedimentaria, las rocas de la Formación Los Santos configuran el tope de la meseta y el terreno donde habita la mayor parte de la población de la zona (Figura 2).

Figura 2

Geología del área de estudio.



*Nota. Sistema de referencia espacial MAGNA Colombia Bogotá.

Adaptado de: Díaz et al., (2009); García, (2022).

La Formación Los Santos se encuentra dividida en tres miembros: Miembro Inferior (K_1lsmi), que contiene sublitoconglomerados arenosos (Figura 3A), limonitas de cuarzo (Figura 3B) y sublitarrenitas de grano medio (Figura 3C); Miembro Medio (K_1lsmm), compuesto por limolitas (Figura 3D) y areniscas muy finas con matriz arcillosa (Figura 3E); y Miembro Superior (K_1lsm s), correspondiente a areniscas conglomeráticas (Figura 3F) y areniscas de grano fino (Figura 3G).

Figura 3

Formación Los Santos en la sección estratigráfica de La Navarra.



Adaptado de: Aldana (2008)

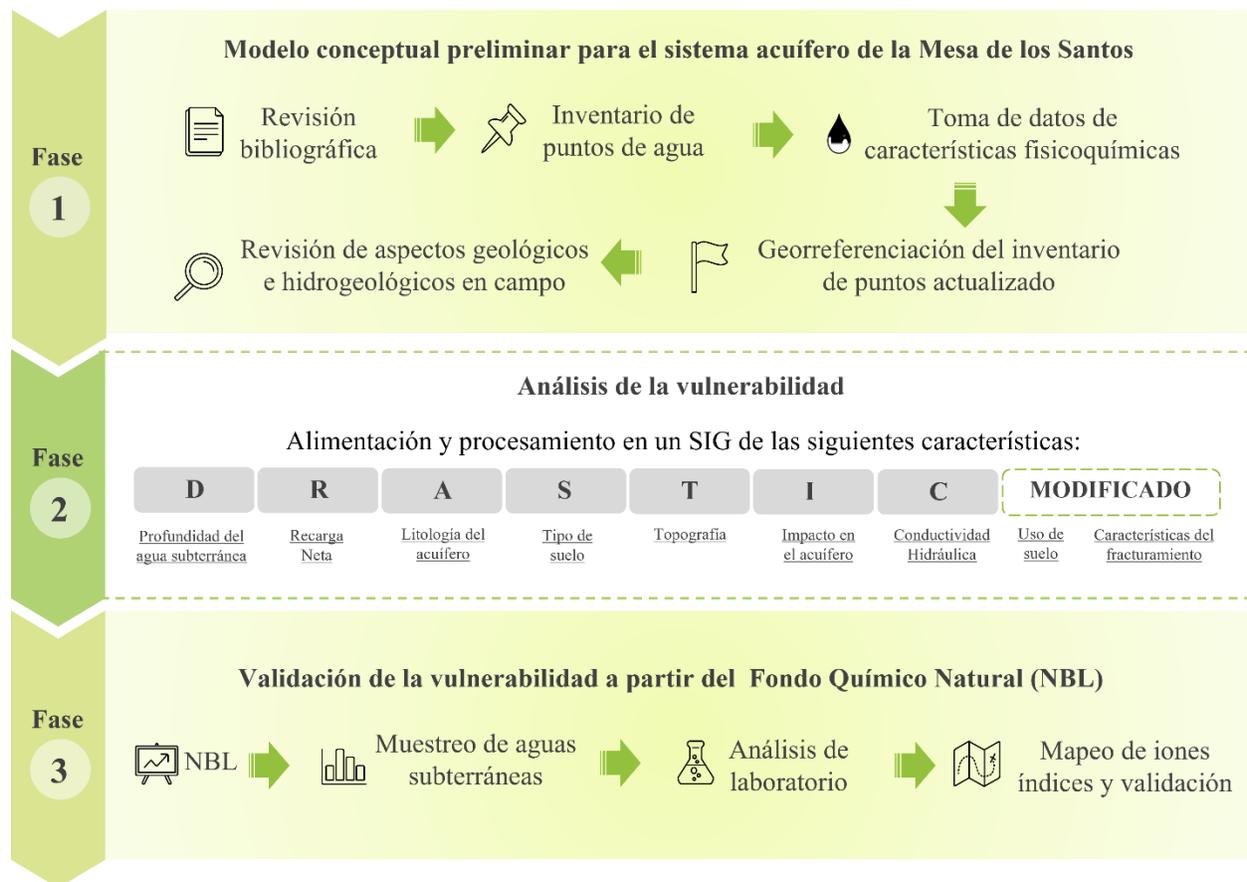
Hacia el noroeste de la zona de estudio, el K₁lsms presenta en su parte media una secuencia de areniscas muy finas a finas con arcillolitas y limonitas en capas delgadas a medianas (2.7 – 7 m), y hacia el noreste desarrolla suelos residuales de hasta 2 m de espesor. Este miembro tiene un espesor variable entre 33 a 55 m y representa el mayor potencial hidrogeológico de la zona, configurando un acuífero libre y fracturado (Díaz et al., 2009), el cual es objeto del presente estudio.

6. Metodología

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se siguió una metodología que comprende tres etapas (Figura 4): 1) Establecimiento de un modelo conceptual preliminar para el sistema acuífero, 2) Análisis de la vulnerabilidad, y 3) Validación de la vulnerabilidad a partir de la determinación de los NBL.

Figura 4

Estructura general de la metodología de investigación.



A continuación, se precisan las actividades que fueron necesarias para llevar a cabo cada una de estas fases.

6.1 Fase 1. Establecimiento de un Modelo Conceptual Preliminar para el Sistema

Acuífero

Para establecer el modelo conceptual preliminar del sistema acuífero de la zona de estudio fue necesario realizar: una revisión bibliográfica, actualización del inventario de puntos de agua, toma de datos de características fisicoquímicas, georreferenciación del inventario de puntos actualizado y revisión de aspectos geológicos e hidrogeológicos en campo.

6.1.1 Revisión bibliográfica

Esta etapa consistió en la consulta, recopilación y análisis de la información del área de estudio publicada en trabajos de pregrado, posgrado y por documentos de entidades públicas y privadas con enfoque principal a la geología, hidrología, hidrogeología, geomorfología y suelos.

Se accedió a la información de documentos de tipo investigativo (trabajos de grado, tesis y artículos); información hidrológica de tres (3) estaciones, dos (2) pluviométricas y una climática cuyos detalles se enlistan en la Tabla 2; 38 informes de concesiones de puntos de aguas subterráneas brindadas por la Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS) y algunos propietarios de los predios visitados, cuya información contenida se resume en la Tabla 3. Además, se pudo acceder de forma libre a la cartografía básica y temática oficial del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) a través plataforma “Colombia en Mapas” (<https://www.colombiaenmapas.gov.co/>), y la cartografía temática del Servicio Geológico

Colombiano, disponible en el Geoportal (<https://www2.sgc.gov.co/sgc/mapas/paginas/geoportal.aspx>).

Tabla 2

Información hidrológica disponible.

Estación	Tipo	Entidad	Fecha de instalación	Coordenadas		Altura (msnm)
		Operadora		Norte	Este	
LA MESA	Pluviométrica	IDEAM	15/11/1973	1239302,33	1108868,06	1460
PRIVADA	Pluviométrica	Privada	01/02/2010	1250151,78	1114619,34	1641,94
LLANADAS	Climática Automática	GPH – UIS	09/09/2020	1249937,69	1105779,63	1432,71

Tabla 3

Información disponible en los informes de concesión de agua subterránea.

ID	Tipo	Profundidad (m)	INFORMACIÓN DISPONIBLE					
			Geoeléctrica	Diseño de pozo	Descripción Litológica	Análisis Físicoquímico	Análisis Microbiológico	Prueba de bombeo
PC1	Pozo	40	x	x	x	x	x	x
PC2	Pozo	~80	x					
PC3	Pozo	~90	x					
PC4	Pozo	~80	x					
PC5	Pozo	90	x	x	x	x	x	x
PC6	Pozo	~35	x					
PC7	Pozo	~120	x					
PC8	Pozo	~85	x					
PC9	Pozo	90	x	x	x	x	x	
PC10	Pozo	~90	x					
PC11	Pozo	~90	x					
PC12	Aljibe	12				x	x	
	Aljibe	12				x	x	
	Aljibe	12				x	x	
PC13	Pozo	152				x	x	

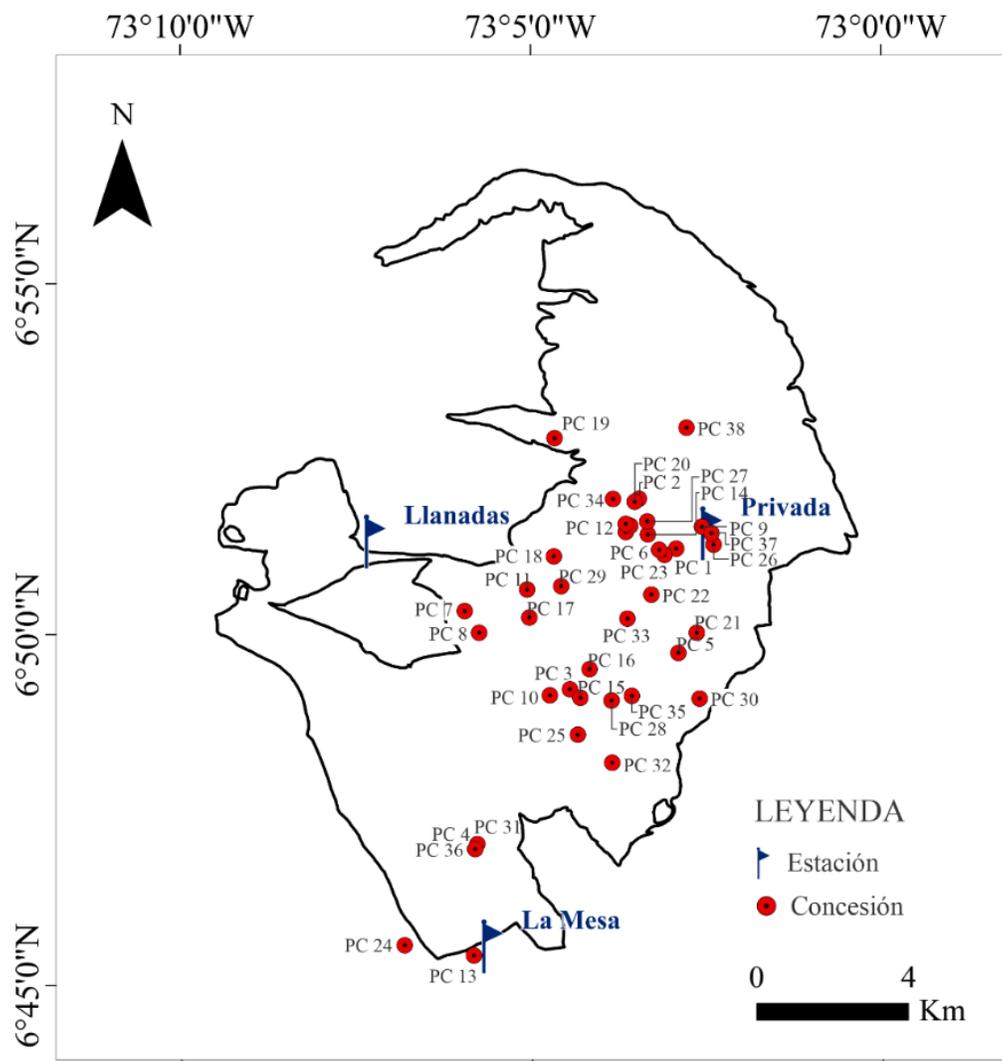
ID	Tipo	Profundidad (m)	INFORMACIÓN DISPONIBLE					
			Geoeléctrica	Diseño de pozo	Descripción Litológica	Análisis Físicoquímico	Análisis Microbiológico	Prueba de bombeo
PC14	Pozo	~60	x					
PC15	Pozo	~100	x					
PC16	Pozo	82		x	x			x
PC17	Pozo	~80	x					
PC18	Aljibe	12						
PC19	Aljibe	10						
PC20	Pozo	~72	x					
PC21	Pozo	~80	x					
PC22	Pozo	90.5			x	x	x	x
PC23	Aljibe	7						
PC24	Pozo	S.I.	x			x	x	
PC25	Pozo	81	x		x			x
PC26	Pozo	~80	x					
PC27	Pozo	50	x	x	x			x
PC28	Pozo	85	x	x	x	x	x	
PC29	Pozo	50				x	x	x
PC30	Aljibe	3.2						
PC31	Pozo	90	x	x	x	x	x	x
PC32	Pozo	50		x		x	x	
PC33	Pozo	82		x	x			x
PC34	Pozo	80			x			x
PC35	Pozo	125			x			x
PC36	Pozo	~80	x	x				
PC37	Pozo	102		x	x			
PC38	Pozo	61.3	x	x	x	x	x	x

* *Nota.* PC: punto de concesión; S.I.: sin información

En la Figura 5 se muestra la localización de las estaciones y puntos de concesión de agua subterránea en el área de estudio.

Figura 5

Localización de estaciones y puntos de concesión de agua subterránea.



*Nota. PC: punto de concesión. Sistema de referencia espacial MAGNA Colombia Bogotá.

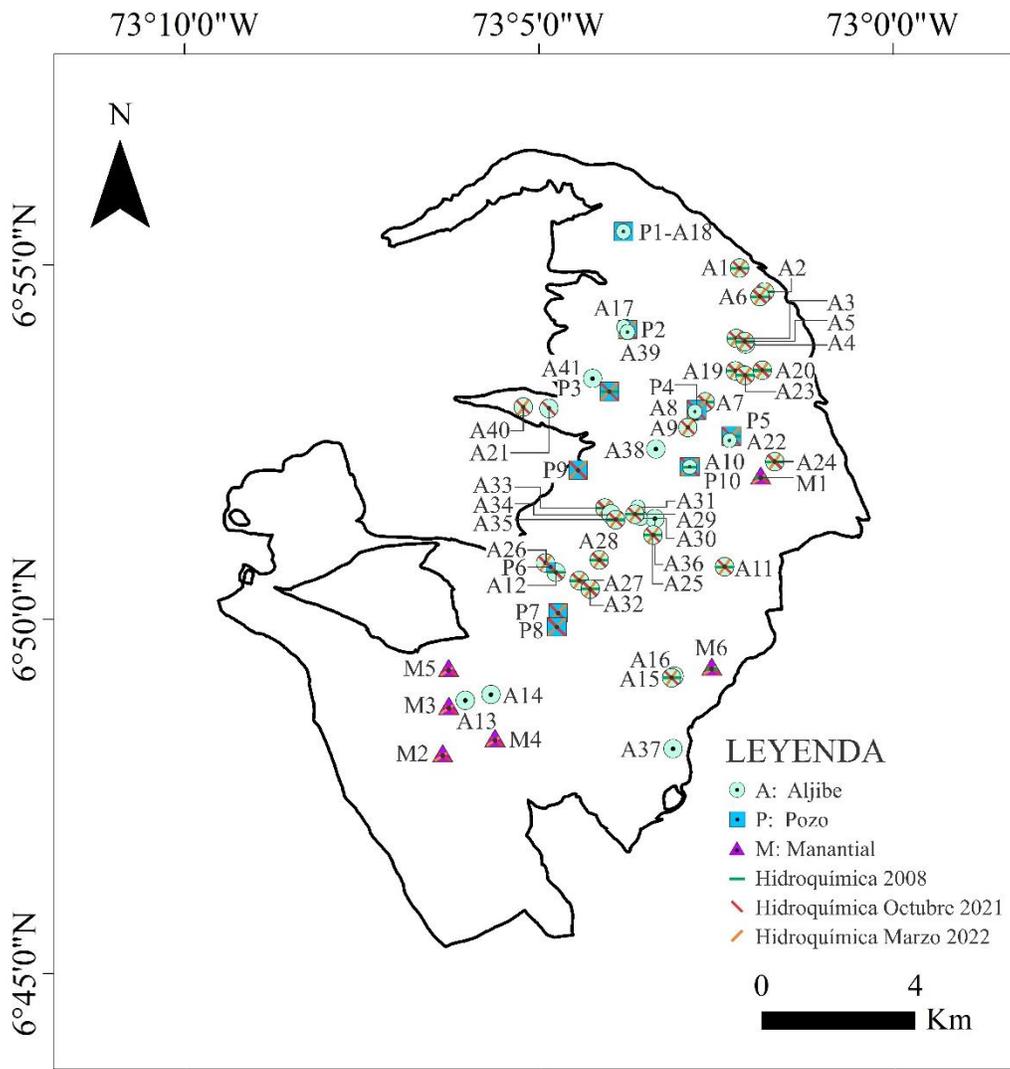
6.1.2 Actualización del inventario de puntos de agua

A partir de inventarios anteriores de puntos de agua subterránea (Becerra y Parra, 2016; Pinto et al., 2007), se programaron visitas a la zona de estudio con el fin de solicitar el acceso a manantiales, aljibes y pozos que estuvieran localizados sobre el Miembro Superior de la

Formación Los Santos. Se priorizaron los sitios que contaran con información de hidroquímica (año 2008), obteniéndose el permiso de monitorear 57 puntos: 41 aljibes, 10 pozos y 6 manantiales, cuya localización y detalles principales se muestra en la Figura 6. El Anexo A contiene los detalles de los puntos de agua actualizado.

Figura 6

Localización de los puntos del inventario de puntos de agua actualizado.



*Nota. Sistema de referencia espacial MAGNA Colombia Bogotá.

6.1.3 Toma de datos de características fisicoquímicas

Los 57 puntos inventariados para este proyecto fueron visitados en su mayoría en 4 ocasiones, la primera entre el 27 de abril y el 4 de mayo de 2021, la segunda entre el 26 y el 28 de junio del 2021, la tercera entre el 25 y el 29 de octubre de 2021 (época lluviosa), y la cuarta entre el 1 y el 4 de marzo de 2022 (época seca). En cada visita se tomó información general para alimentar la base de datos del inventario usado en este proyecto, así como tomas específicas de sus características fisicoquímicas in situ correspondiente a los niveles estáticos (m), conductividad eléctrica (uS/cm), pH, temperatura (°C) y oxígeno disuelto (%). Esta información se recogió con el fin de analizar los rangos de valores de cada propiedad y observar las variaciones actuales de dichas propiedades de acuerdo con el comportamiento climático de la zona. Para la toma de niveles se usó una sonda de contacto marca Seba Hydrometrie de modelo kll-1550m y un medidor Portátil Multiparamétrico pH/CE/DO de marca Hanna para las demás propiedades. En el Anexo A se especifican los valores medidos en cada visita para cada punto del inventario de aguas subterráneas.

6.1.4 Georreferenciación del inventario de puntos actualizado

Se realizó la georreferenciación del nuevo inventario de puntos de agua con GPS Stonex S800A que cuenta con topografía estática de alta precisión (Precisión vertical de 2.5 mm + 1 ppm RMS, precisión horizontal de 5.0 mm + 1 ppm RMS), lo cual permitió establecer niveles freáticos y direcciones de flujo más exactas (ver Anexo A).

6.1.5 Revisión de aspectos geológicos e hidrogeológicos en campo

Con el fin de precisar la geometría y las variaciones texturales de las rocas que componen el miembro acuífero de interés, se realizó la verificación de los espesores y de descripción litológica del Miembro Superior de la Formación Los Santos (K₁lsmS), a través de campañas de campo realizadas en los cuatro sitios donde se habían levantado columnas estratigráficas: La Punta, El Carrizal (Rincon, 2008), La Navarra y El Calicho (Aldana, 2008). En el Anexo B se presentan los detalles litoestratigráficos obtenidos en campo. Adicionalmente, se actualizó el modelo cinemático de la zona de estudio de acuerdo a los resultados obtenidos por el análisis estructural desarrollado en García (2022).

6.2 Fase 2. Análisis de Vulnerabilidad

Para el análisis de la vulnerabilidad usando los métodos DRASTIC y DRASTIC Modificado fue necesario realizar las siguientes actividades usando como soporte principal de la base de datos el software ArcGis (<https://www.arcgis.com/index.html>):

- a. Recopilar la cartografía temática que define los parámetros evaluados por estos métodos (profundidad del agua subterránea, recarga, litología del acuífero, tipo de suelo, pendiente, naturaleza de la zona no saturada, conductividad hidráulica, uso de suelo y características del fracturamiento).
- b. Categorizar los mapas temáticos en áreas homogéneas y concordantes a las tasas de valoración definidas para cada variable en la evaluación de vulnerabilidad como indica MAVDT (2010) para DRASTIC y como se propone en este estudio para el DRASTIC Modificado teniendo en cuenta las recomendaciones de Sener & Davraz, (2013) y respetando las características propias del área de estudio.

- c. Asignar un atributo de valoración numérica de acuerdo con la categorización realizada.
- d. Convertir los mapas a formato RASTER con celdas de tamaño 12.5 x 12.5 m.
- e. Aplicar las funciones de vulnerabilidad *ID* (Índice DRASTIC) e *IDM* (Índice DRASTIC Modificado) usando algebra de mapas, siguiendo las Ecuaciones 1 y 2 descritas en el apartado 3.2.1.

Los valores de w y r asignados para cada parámetro y sus variables con el fin de calcular el *ID* siguen lo establecido por el MAVDT, (2010). Para calcular el *IDW*, se asignó a L_u y a F un valor de w de acuerdo a lo sugerido por Sener & Davraz (2013), mientras que los valores de r asignado a sus variables, aunque tuvieron como base la revisión de literatura (de Souza et al., 2022; Jenifer & Jha, 2018; Sener & Davraz, 2013) se asignaron a criterio de la investigación según la importancia relativa de estas en la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación. Los pesos, clases y tasas asignados a cada parámetro que interviene en el cálculo del *ID* y el *IDW* se muestran en la Tabla 4.

Tanto DRASTIC como DRASTIC Modificado clasifican la vulnerabilidad en 5 categorías correspondientes a muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto según los rangos indicados en la Tabla 4. Los límites para las categorías del DRASTIC Original fueron tomados del MAVDT, (2010), mientras que los límites para las categorías del DRASTIC Modificado fueron calculados usando la herramienta de clasificación de datos “Intervalo Equivalente” de ArcGis, la cual permitió generar rangos lineales y homogéneos crecientes, similares al DRASTIC Original, esto con el fin de poder hacer comparaciones entre ambas metodologías (Rueda, 2006).

Tabla 4

Factores de valoración para cálculo de vulnerabilidad usando DRASTIC y DRASTIC Modificado.

VARIABLE	VALORACIÓN
D_w = 5 / (m)	D_r
0 - 1,5	10
1.5 - 4.6	9
4.6 - 9.1	7
9.1 - 15.2	5
15.2 - 22.9	3
22.9 - 30.5	2
> 30.5	1
R_w = 4 / (mm/año)	R_r
0 - 50	1
50 - 103	3
103 - 178	6
178 - 254	8
> 254	9
A_w = 3	A_r
Suelos arenosos con un poco de arcilla y grava	8
Arenisca masiva	6
S_w = 2	S_r
Delgado o ausente	10
Franco arenoso	8
Arena franca	6
Franco arcillo arenoso	5
Arcillo arenosa	3
Franco arcillosa	2
Arcillosa	1
T_w = 1 / (%)	T_r
0 - 2	10
2 - 6	9
- 12	5
12 - 18	3
> 18	1
I_w = 5	I_r
Suelos arenosos con algo de grava y arcilla	8
Arenisca meteorizada con M.O.	7
Arenisca fracturada fina a media con presencia de M.O.	6
Arenisca con arcilla y M.O.	5
Intercalación de limolitas-lutitas con arenisca fracturada	4
Arcillas con M.O.	3

VARIABLE	VALORACIÓN
C_w = 3 (m/día)	C_r
0.04 - 4.08	1
4.08 - 12.22	2
12.22 - 28.55	3
28.55 - 40.75	6
40.75 - 81.49	8
> 81.49	10
Lu_w = 5	Lu_r
Producción animal	10
Urbano	9
Agricultura	8
Estación de servicio	7
Cuerpos de agua	5
Espacios naturales poco intervenidos	4
Espacios naturales no intervenidos	3
Bosques y áreas de producción	2
Tierras sin ningún uso asociado	1
F_w = 3	F_r
Fracturas abiertas y alta densidad de fracturas	10
Fracturas abiertas y densidad media de fracturas	8
Fracturas abiertas y baja densidad de fracturas	6
Fracturas cerradas y alta densidad de fracturas	5
Fracturas cerradas y densidad media de fracturas	3
Fracturas cerradas y baja densidad de fracturas	1

*Nota. D: profundidad de las aguas subterráneas; R: recarga; A: litología del acuífero; S: textura del suelo; T: Topografía; I: impacto en el acuífero; C: conductividad hidráulica; Lu: uso de suelo; F: Características del fracturamiento; w: peso del parámetro; r: tasa valoración de cada variable.

Adoptado de: MAVDT, (2010), Sener & Davraz (2013)

Tabla 5

Valores límites para los índices de vulnerabilidad *DRASTIC (ID)* y *DRASTIC Modificado (IDM)*.

INDICES DE VULNERABILIDAD				
Categorías	DRASTIC		DRASTIC MODIFICADO	
	Valores límites de los intervalos		Valores límites de los intervalos	
Muy Bajo	23	64	31	85
Bajo	> 64	105	85	139
Moderado	> 105	146	139	193
Alto	> 146	187	193	247
Muy Alto	> q187	230	247	306

Adaptado de: MAVDT, (2010)

A continuación, se detalla cada uno de los parámetros evaluados por los métodos de vulnerabilidad y las actividades específicas que se realizaron para poder aplicar las funciones de vulnerabilidad en el SIG.

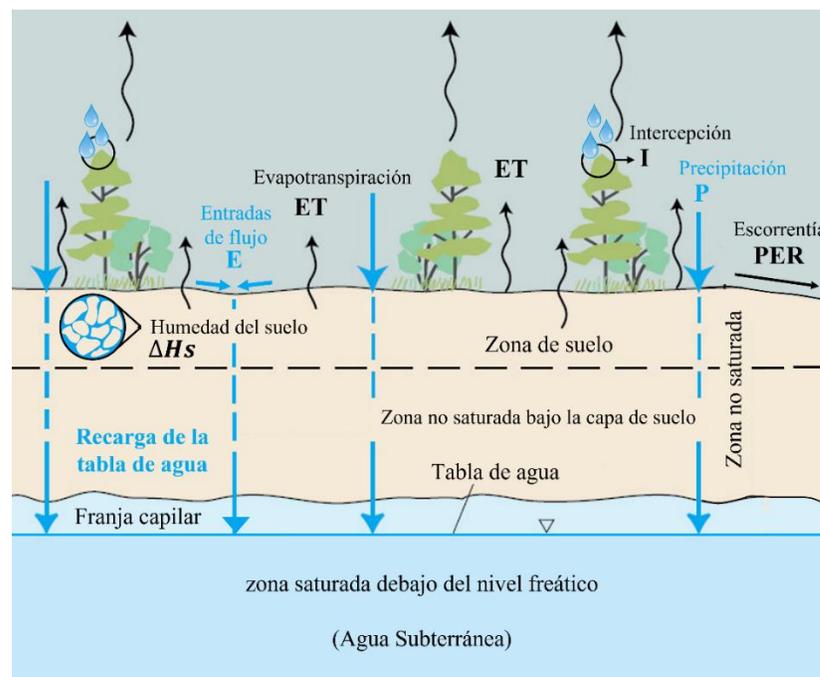
D - Profundidad del agua subterránea: Corresponde a los niveles piezométricos (N.P.) en época lluviosa, medidos en *m* (MAVDT, 2010). Para este estudio se interpolaron los niveles piezométricos inventariados en época lluviosa (entre el 27 de abril y el 4 de mayo del 2021) haciendo control en las zonas de ladera. Los datos de insumo están disponibles en el Anexo A. La interpolación de los niveles se realizó utilizando la herramienta *Kriging* de Surfer, la cual generó una capa en formato *.shp* que fue migrada a ArcGis con el fin de categorizar la profundidad a la que se encuentra el agua subterránea en el área de estudio de acuerdo con los rangos establecidos por el MAVDT (2010) según la Tabla 4.

R – Recarga: Corresponde a los valores de recarga potencial anual para el acuífero; en *mm/año* (MAVDT, 2010). Este valor fue estimado a través de la ejecución del código libre Soil-Water-Balance (SWB), desarrollado por la agencia geológica de los Estados Unidos (Westenbroek

et al., 2010), el cual permite la estimación de la recarga potencial de agua subterránea a partir del balance de humedad en el suelo mostrado en la Figura 7 y en la Ecuación 3 mediante el uso de capas de información geográfica SIG. El código estima el valor de recarga diaria por pixel en capas de formato *ASCII*, las cuales, mediante rutinas de geoprocésamiento en ArcGis permitieron obtener el valor de recarga anual. En el Anexo C se describe el código SWB y se especifican los datos que fueron ingresados para cada variable en este estudio. El valor obtenido para la recarga por el código SWB fue verificado por la recarga obtenida usando el método de fluctuación de nivel freático (Healy & Cook, 2002) y obtuvo su valor de calificación de acuerdo con lo establecido por el MAVDT (2010), según la Tabla 4.

Figura 7

Diagrama esquemático de la recarga del nivel freático.



Adaptado de: USGS (2023)

$$\text{Recarga} = (P + E) - (I + PER + ET) - \Delta Hs \quad (3)$$

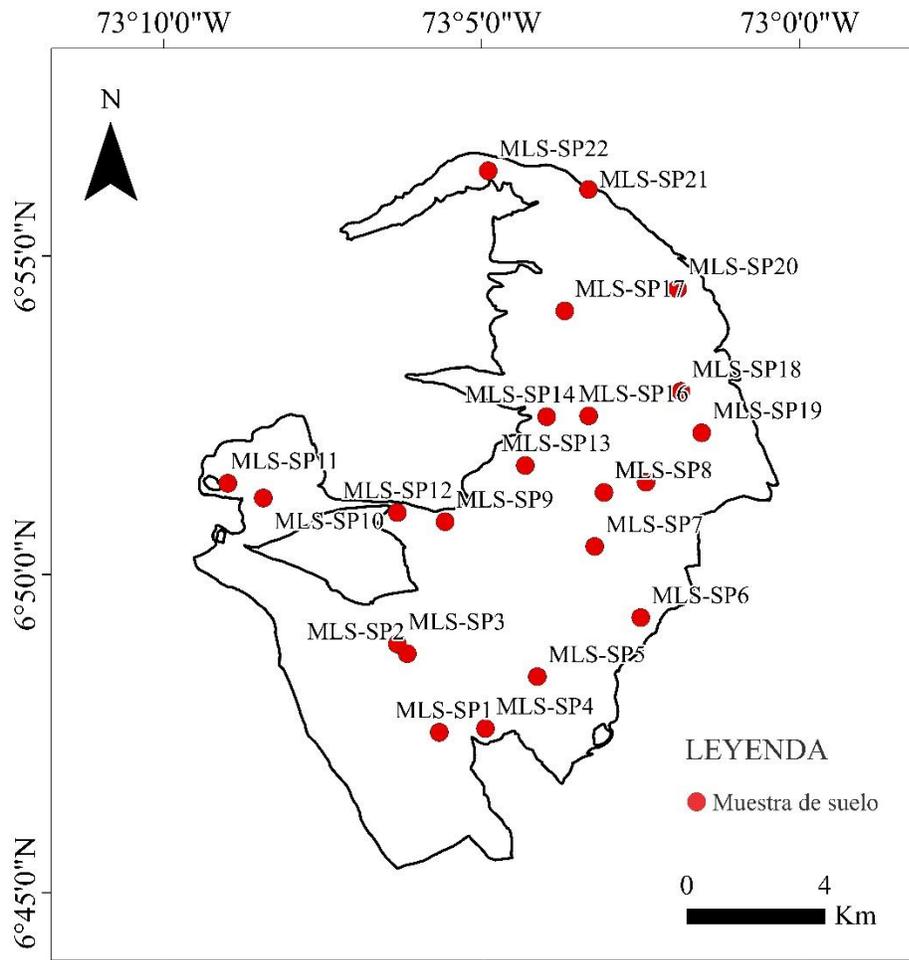
En la Ecuación 3, al igual que en la Figura 7, P es la precipitación, E son las entradas derivadas a la dirección de flujo de agua, I es la intercepción, PER son las pérdidas en relación con la lluvia-escorrentía, ET la evapotranspiración y ΔHs es la humedad del suelo.

A - Litología del acuífero: Corresponde al tipo de roca de la zona saturada (MAVDT, 2010), que en este caso es la definida por el miembro Superior de la Formación Los Santos. La información se obtuvo de las descripciones estratigráficas realizadas por Rincón (2008) y Aldana (2008) y fue verificada en salidas de control de campo. Los detalles litológicos se especifican en el Anexo B. Las áreas definidas para cada tipo de material acuífero adoptan las valoraciones establecidas por el MAVDT (2010) en la Tabla 4.

S - Tipo de suelo: Corresponde a la composición textural de los suelos presentes en la zona de estudio (MAVDT, 2010). La composición textural fue obtenida a través del análisis de 22 muestras de suelos colectadas en campo captando de manera homogénea el material con evidencia de actividad biológica (presencia de microorganismos y raíces secundarias). A estas muestras se les realizó procedimientos de laboratorio para determinación de su textura a través de tamizaje e hidrometría como lo establece la norma ASTM D422-63. Los detalles de los procedimientos de laboratorio, porcentajes de tamaños texturales y clasificaciones para cada muestra se especifican en el Anexo D. La clasificación textural de los suelos siguió las categorías establecidas por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA, 2020). Una vez obtenida la clasificación textural de cada muestra, se marcaron polígonos de influencia en ArcGis los cuales adoptaron una valoración de acuerdo a las categorías establecidas el MAVDT (2010) en la Tabla 4. En la Figura 8 se indica la distribución de los puntos muestreados.

Figura 8

Localización de puntos de muestreo de suelos para determinación de texturas.



*Nota. Sistema de referencia espacial MAGNA Colombia Bogotá.

T - Topografía: Corresponde a las condiciones de pendiente en porcentaje (%) (MAVDT, 2010). Estas fueron obtenidas usando la herramienta “*Slope*” de ArcGis y una imagen con el modelo de elevación digital (DEM) de la zona de estudio. El DEM corresponde a una imagen de radar, obtenida de manera gratuita de la página Alaska Satellite Facility (<https://search.asf.alaska.edu/#/>), tomada por el satélite ALOS, a través del sensor PALSAR, cuya

resolución espacial es de 12.5 m. Las pendientes obtenidas fueron categorizadas y puntuadas según los criterios establecidos para este parámetro según el MAVDT (2010) en la Tabla 4.

I - Impacto en el acuífero: Determinado por las asociaciones de los suelos y del material geológico que se albergan en la zona vadosa (MAVDT, 2010). Esta información se obtuvo a través de la lectura de los registros de perforación de pozos profundos obtenidos en la CAS y facilitados por los propietarios de predios, los cuales se describen en el Anexo E. De acuerdo con el tipo de material en la zona vadosa, esta adoptó una valoración sugerida por el MAVDT (2010) disponible en la Tabla 4.

C – Conductividad Hidráulica: Parámetro definido en *m/día*. Esta información fue obtenida de los informes de pruebas de bombeo de pozos de los que se tiene mayor certeza que hacen parte del acuífero de estudio y calificada con pesos y tasas como sugiere el MAVDT (2010) en la Tabla 4. La información representativa de las pruebas de bombeo se encuentran el Anexo F.

Lu – Uso de suelo: Relaciona las actividades que pueden afectar negativamente la calidad de las aguas subterráneas ya que, aparte de ser fuentes directas de contaminación, están relacionadas con actividades agrícolas como la labranza que mejoran el movimiento de agua, y con ello, el de contaminantes hacia el acuífero (Jenifer & Jha, 2018; Sener & Davraz, 2013). Esta información se obtuvo usando como base el mapa de coberturas realizado por Romero y Urrea (2021), al cual, en este estudio se le relacionaron los diferentes usos de suelo mediante la extracción de información obtenida mediante encuestas, mapas sociales y recorridos en campo. En la Tabla 6 se sintetiza la asociación de las coberturas con los datos de usos que dio paso al establecimiento de este parámetro, categorizado y calificado como se indica en la Tabla 4, donde, las actividades relacionadas con actividades agropecuarias y agrícolas presentan una mayor puntuación, indicando una mayor vulnerabilidad.

Tabla 6*Coberturas de suelo y usos asociados.*

COBERTURA	USOS IDENTIFICADOS	USO ASOCIADO
Pastos limpios	Pastoreo vacuno, pecuaria avícola, recreación	Producción Animal
Galpones	Pecuario avícola	
Granjas ganaderas	Pecuario vacuno	
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Agrícola y pecuario	
Tejido urbano continuo – discontinuo	Urbano (Parcelaciones, barrios, zonas de explanación con pozos sépticos)	Urbano
Instalaciones recreativas	Urbano (Restaurantes, estaderos y residencias de uso turístico, con pozos sépticos)	
Cultivos permanentes herbáceos	Agrícola	Agricultura
Mosaico de cultivos	Agrícola	
Cultivo de piña	Agrícola	
Cultivo de café	Agrícola	
Mosaico de pastos y cultivos	Agrícola	
Zonas industriales/comerciales	Estación de servicio	Estación de servicio
Cuerpos de agua artificiales	Recursos hídricos, recreacional	Cuerpos de agua
Lagunas	Recursos hídricos	
Mosaico de pastos con espacios naturales	Áreas ocupadas por relictos de bosque natural, arbustales, bosque de galería o ripario y otras áreas no intervenidas o poco transformadas	Espacios naturales poco intervenidos
Pastos enmalezados	Relacionado con escasas prácticas de manejo o relacionados con procesos de abandono	
Arbustal	Zonas generalmente poco intervenidas, destinadas a la protección - producción	Espacios naturales no intervenidos
Vegetación secundaria o en transición	Zonas generalmente poco intervenidas, destinadas a la protección - producción	
Herbazal	Zonas generalmente poco intervenidas, destinadas a la protección - producción	
Plantación Forestal	Plantación Forestal de protección (reforestación) y producción de madera	
Bosque de galería y ripario	Bosque de protección de bordes de cursos de agua	Bosques y áreas de producción
Tierras desnudas y degradadas	Tierra desprovista de vegetación sin ningún uso asociado	Tierras sin ningún uso asociado

F – Características del Fracturamiento: Relaciona la densidad y zonas con fracturas abiertas o cerradas, aspectos que definen el movimiento y almacenamiento de las aguas subterráneas de la zona de estudio. Esta información fue obtenida a través de la combinación de los mapas propuestos por Diaz et al. (2009) para estas características del fracturamiento por bloques estructurales. Para la definición de fracturas abiertas o cerradas, Diaz et al. (2009) estudió las direcciones de los esfuerzos compresivos y distensivos; en cuanto a la densidad del fracturamiento, el autor definió tres categorías: “Densidad Alta”, “Densidad Media” y “Densidad Baja”. La categoría “Densidad Alta” corresponde a las zonas con fracturas cuyo espaciamiento es menor a los 20 cm, la categoría “Densidad Media” corresponde a las zonas con fracturas cuyo espaciamiento está entre los 20 y 50 cm, y la categoría “Densidad Baja”, corresponde a las zonas con espaciamientos de fracturas mayores a los 50 cm. Estas características fueron integradas en una sola con las categorías definidas en la Tabla 4 mediante rutinas de geoprocesamiento a través del algebra de mapas de ArcGis.

6.3 Fase 3. Validación de Mapas de Vulnerabilidad a Partir del Fondo Químico Natural

En este trabajo, la validación de los mapas de vulnerabilidad se realizó a través del análisis de la proporción de áreas ocupadas por cada clase de vulnerabilidad obtenida por los métodos DRASTIC original y DRASTIC Modificado donde se supera la concentración de los NBL para iones considerados como indicadores satisfactorios de contaminación ambiental. Según Aragão et al. (2020), estos iones corresponden al Nitrato (NO_3^-), que ha sido identificado como indicador de pesticidas, fertilizantes, sistemas sépticos, compuestos de nitrógeno en el aire; fosfato (PO_4^{3-}), asociado a fertilizantes químicos, estiércol y material compostado; sulfato (SO_4^{2-}), indicador de

residuos domésticos o industriales y oxidación de sulfuros de la minería; y cloruro (Cl^-), relacionado con aguas residuales, fertilizantes y ablandadores de agua.

Para determinar los NBL de las aguas subterráneas se siguieron los lineamientos que recomiendan localizar aguas donde no existan trazas de impacto humano (Edmunds et al., 2003; Shand et al., 2007). Para esto, se usaron resultados de hidroquímica obtenida para 39 muestras de agua subterránea analizadas en el año 2008, periodo en el cual la expansión urbana en la zona de estudio era menor a la actual, esperando que estos datos reflejaran una baja a nula intervención antrópica. El resumen de la hidroquímica usada para determinar los NBL, se presenta en el Anexo G. Adicionalmente, las muestras fueron seleccionadas teniendo en cuenta que sus valores de concentraciones iónicas para NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} no superaran los valores de referencia estandarizados para el agua potable según la legislación nacional Colombiana (Decreto 1575 de la resolución 2115 de 2007 (MinSaludCol, 2007) (Lucon et al., 2018).

Para el caso del ion Cl^- , el nivel de referencia que se aceptó para la obtención de los NBL fue de 10 mg/L, ya que, las concentraciones halladas en los muestreos (rango entre 1.4 mg/L - 162.7 mg/L), aunque son aceptadas por la normatividad, no corresponden en su mayoría a un origen derivado de fuentes naturales (geológicas, biológicas o atmosféricas), partiendo de un contexto hidrogeológico dominado por rocas siliclásticas donde no hay evidencia de la presencia de litologías evaporíticas que puedan aportar el ion Cl^- , y donde las aguas lluvias presentan valores de Cl^- en el rango 0.02 mg/L – 4.45 mg/L según la caracterización química realizada por Barrera (2006) para las aguas lluvias del Macizo de Santander en la Cuenca Superior del Río Lebrija.

Una vez depuradas las muestras, se siguió la metodología sugerida en APAT-ISS (2006), BRIDGE (2006) e ISPRA (2009), donde, para un conocimiento geoquímico medio de las masas de aguas subterráneas, se permite usar el método de preselección, en el cual, los NBL corresponden

al percentil 90 de la gráfica de distribución de probabilidad de la concentración de un determinado ion en las muestras. De manera inicial, se determinó la mejor distribución estadística para cada ion, a través de la herramienta de “*identificación de Distribución individual*” del software Minitab, versión 20, el cual, mediante la prueba de Anderson Darling, compara las diferentes distribuciones, generando como referencia valores de probabilidad (p) y Anderson Darling (AD), donde el mejor ajuste está dado por la combinación de un valor de p más significativo (con valor mínimo aceptable del 5%) y un AD pequeño (Minitab, 2022). También se calcularon la media, mediana, desviación estándar, $Q1$ y $Q3$ y se indicaron los valores de referencia de agua apta para consumo humano de cada ion según la legislación nacional Colombiana (Decreto 1575 de 2005 de la Resolución 2115 de 2007 (MinSaludCol, 2007).

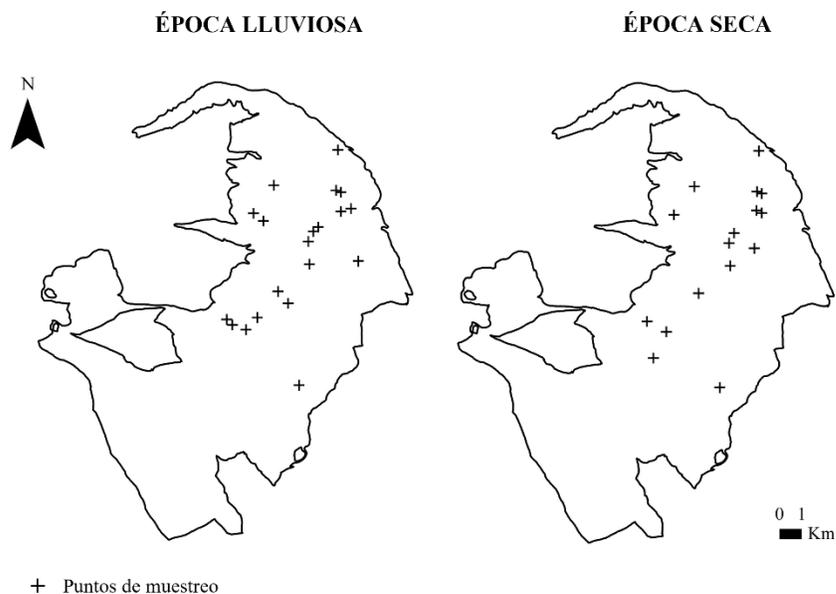
Posteriormente, se cartografiaron las áreas donde los iones indicadores de contaminación presentaban concentraciones mayores a sus NBL en época lluviosa, en base a los análisis fisicoquímicos obtenidos para 20 muestras colectadas en octubre de 2021, y en época seca, a partir de los análisis fisicoquímicos obtenidos para 16 muestras colectadas a finales de febrero de 2022. La localización de los puntos de muestreo para cada época se indica en la Figura 9.

El análisis fisicoquímico de las muestras colectadas fue realizado en Laboratorio Químico de Consultas Industriales de la Universidad Industrial de Santander. Los métodos usados fueron: Conductivimétrico – SM 2510 B (conductividad), potenciométrico SM 4500 – H^+ (pH), Tritimétrico - SM 2320 B (alcalinidad total, carbonatos y bicarbonatos), Turbidimétrico – SM 4500 – SO_4^- E (sulfatos), Argentométrico SM 4500 – Cl^- B (cloruros), Absorción Atómica – SM 3030 E y SM 3111 B (sodio, potasio, magnesio, manganeso y calcio), Espectrofotométrico - SM 4500-P-E (fosfatos), Epectrofotométrico – SM 4500 – NO_3 (nitratos), y Espectrofotométrico – SM 3500-Fe – B (hierro total). La calidad de los resultados de laboratorio fue revisada en función del

error del balance iónico de las muestras de acuerdo a los rangos de conductividad eléctrica (IDEAM, 2015), y se resumen en el Anexo H para las muestras de la época lluviosa y en el Anexo I para las muestras de la época seca.

Figura 9

Localización de puntos de muestreo de agua subterránea para análisis de hidroquímica.



La distribución espacial de la concentración de cada ion fue realizada a través de la interpolación y extrapolación de los datos puntuales adquiridos en campo usando la herramienta Surfer (<https://www.goldensoftware.com/products/surfer>) con método de cuadrícula tipo Kriging y un variograma lineal.

Finalmente, usando las herramientas disponibles en ArcMap versión 10.5 (<https://desktop.arcgis.com/es/desktop/>), se calcularon las áreas de cada clase de vulnerabilidad que coinciden con las áreas donde se superan los NBL de cada ion con el fin de analizar cuál de

los dos métodos aplicados para la estimación de la vulnerabilidad se acerca a la realidad de la actual contaminación de la zona de estudio y si hay o no influencia por la temporalidad (época lluviosa – época seca). El método con mayor ajuste corresponde a aquel que muestra una mayor coincidencia de NBL rebasados para los iones NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} y Cl^- con la clase de vulnerabilidad alta o muy alta.

7. Resultados y Discusión

7.1 Modelo Hidrogeológico Conceptual Preliminar

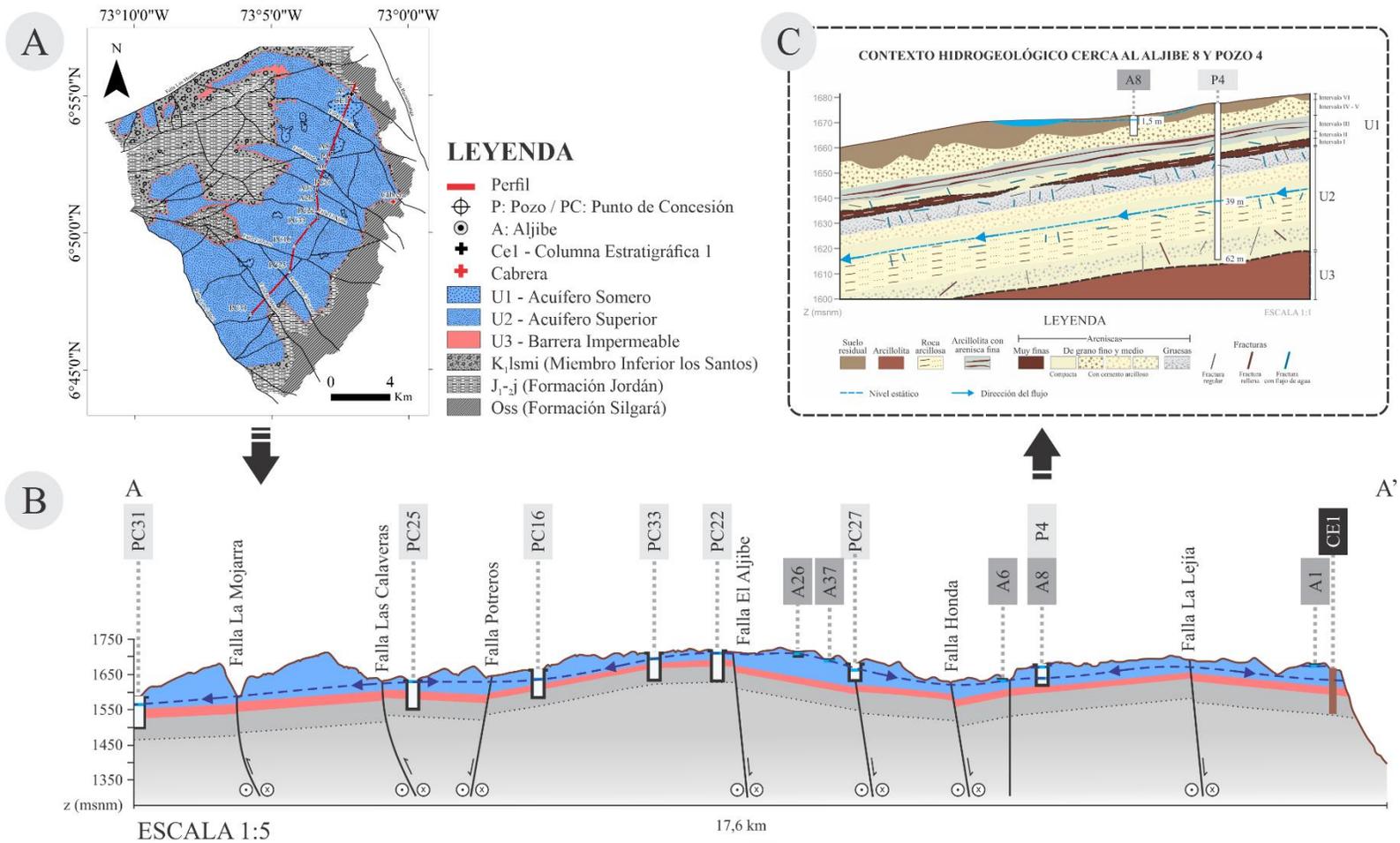
Hidrogeológicamente se han identificado dos acuíferos en el K₁lsm_s, denominados en este estudio como Acuífero Somero y Acuífero Superior, los cuales configuran las Unidades Hidrogeológicas 1 (U1) y 2 (U2) respectivamente, siendo separados del sistema acuífero localizado en el K₁lsm_i por la Unidad Hidrogeológica 3 (U3), que corresponde a un sello o barrera impermeable definido por las rocas arcillosas del K₁lsm_m, en concordancia con las premisas planteadas en los estudios de Díaz et al. (2009), Hincapié y Veloza (2009) y Pinto et al. (2007), como se ilustra en las Figuras 10A y 10B (Con mejor detalle en el Anexo J).

El Acuífero Somero (U1) es de tipo libre y se plantea como un reservorio discontinuo, el cual ha sido delimitado en sectores específicos del área de estudio tal como se muestra en la Figura 10A. Su extensión se limita a la información colectada en los puntos del inventario actualizado, la cual ha sido controlada cartográficamente por la distribución de zonas húmedas identificadas en las visitas de campo y análisis de imágenes satelitales de Google Earth.

Las aguas del Acuífero Somero se localizan hacia el norte en los intervalos del perfil de meteorización de las rocas del K₁lsm_s. Este estudio no profundizó en análisis para definir con precisión cada uno de los intervalos del perfil de meteorización como lo establecen las diferentes metodologías de modelos conceptuales para perfiles de meteorización (p. ej. Brown, 1981; Dewandel, 2006; Borelli et al., 2013). No obstante, se hizo una asociación de intervalos en base a la información litológica disponible (descripción de columnas e informes de perforación de pozos profundos, haciendo énfasis en el pozo P4). Esta información puede observarse en la Figura 10C.

Figura 10

Modelo hidrogeológico conceptual preliminar. A) Mapa generalizado de las unidades hidrogeológicas. B) Corte hidrogeológico. C) Detalle del sistema acuifero albergado en el Miembro Superior de la Formación Los Santos.



Siguiendo el modelo de intervalos meteorizados de Brown (1981), el perfil de meteorización de las rocas del Miembro Superior de la Formación Los Santos localiza rocas frescas (Intervalo I) a una profundidad de aproximadamente 20 - 30 m con una capa de areniscas pardas muy finas con líticas de arcillolita café, que, de manera adicional, configura el nivel de materiales finos que sostiene las aguas del Acuífero Somero y que pueden observarse en superficie en el sector conocido como la Cabrera. A las rocas frescas del intervalo I le suprayacen areniscas de grano fino y medio con cemento arcilloso, ligeramente meteorizadas con fracturas verticales y diagonales ligeramente oxidadas que indican flujo de agua (Intervalo II). Continúa una franja de intercalaciones de arcillolitas gris verdosas con areniscas pardas muy finas moderadamente meteorizadas (Intervalo III), luego niveles de areniscas claras de grano fino a medio con cemento arcilloso y oxidación diferencial altamente meteorizadas en la base (Intervalo IV) y completamente meteorizadas hacia el techo (Intervalo V). Finalmente, se tiene en superficie suelos residuales que varían su contenido de materia orgánica y material vegetal (Intervalo IV).

Hacia el sur, las aguas del acuífero somero se localizan en niveles de rocas con alto grado de fracturamiento, presentando una mayor complejidad, la cual debe estudiarse aún con mayor detalle.

Los niveles estáticos del Acuífero Somero van desde casi la superficie hasta un máximo de 5 m de profundidad. El flujo de estos cuerpos no parece tener una orientación definida debido a su carácter local, guardando una estrecha relación con los cuerpos de aguas superficiales presentes relacionados con humedales. En este acuífero se encuentran un número importante de aljibes.

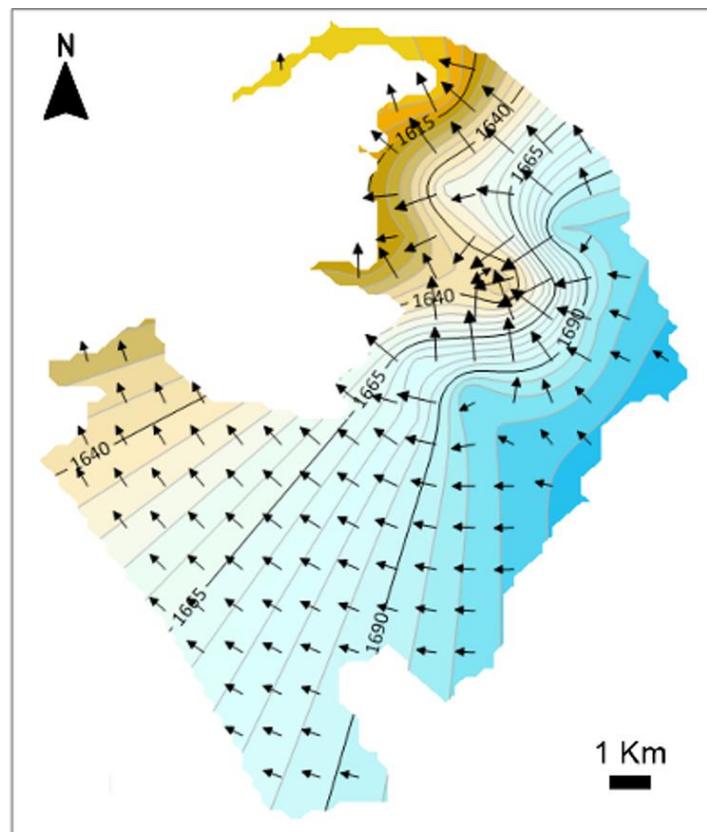
Por otro lado, el Acuífero Superior (U2) es libre, localmente semiconfinado. La capa semiconfinante corresponde a los niveles de rocas finas que sostienen el Acuífero Somero y fracturado. Como se muestra en la Figura 10C, sus aguas se localizan en areniscas de grano fino,

medio y grueso compactas y consolidadas. En este acuífero se plantean flujos rápidos definidos por el control estructural de la zona que genera una porosidad secundaria por fracturas, la cual domina el almacenamiento y la producción de agua debido a que la porosidad primaria de las rocas es baja por su alto grado de cementación. Los niveles estáticos de este acuífero se encuentran entre los 5 m y los 39 m de profundidad. En este acuífero se han construido aljibes y pozos.

Como se muestra en la Figura 11, los flujos de las aguas del Acuífero Superior tienen una dirección E-W, los cuales están controlados por la topografía y la configuración estructural de la zona tal como se indica en el perfil hidrogeológico (Figura 10B).

Figura 11

Flujo del agua subterránea en el Acuífero Superior (U2).

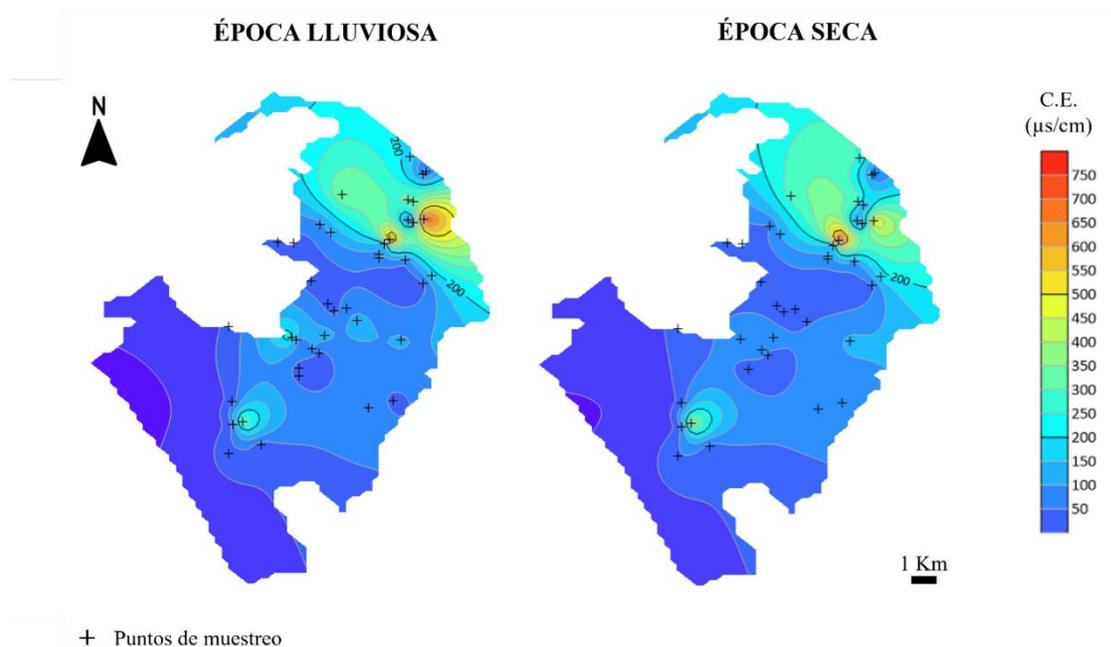


Las aguas contenidas en el Acuífero Somero y el Acuífero Superior podrían estar conectadas, ya sea por la desaparición del nivel que sostiene al Acuífero Somero (capa de areniscas pardas muy finas con líticos de arcillolita café) o por el fracturamiento.

Los parámetros fisicoquímicos en el sistema acuífero (Acuífero Somero y Acuífero Superficial) muestran aguas subterráneas con valores bajos de conductividad eléctrica en el rango de 9 - 281 $\mu\text{S}/\text{cm}$, soportando la hipótesis de una relación directa con las aguas superficiales y una circulación por las fracturas que implica recorridos y tiempos de permanencia cortos, causando baja concentración de sólidos y sales disueltas debido al flujo local. Algunos valores de conductividad atípicos (de hasta 788 $\mu\text{S}/\text{cm}$) están relacionados con la presencia de factores contaminantes (Figura 12).

Figura 12

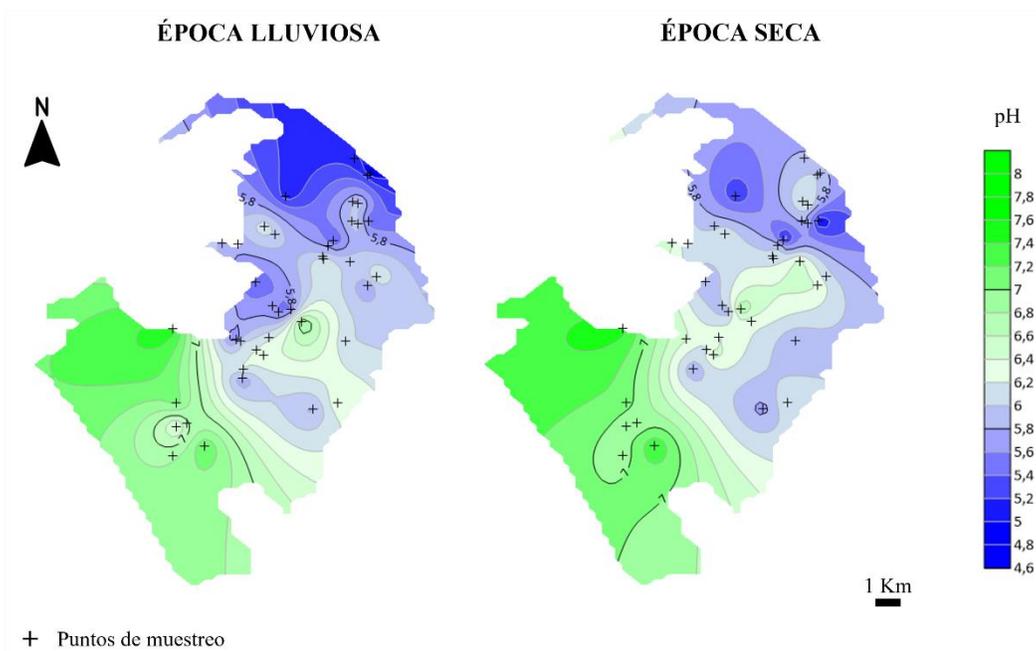
Conductividad Eléctrica del Sistema Acuífero del Miembro Superior de la Formación Los Santos.



En cuanto al pH, sus valores en general son aceptables, con aguas ácidas (pH de 4.8 y 5.6) y ligeramente ácidas (pH de 6.4) hacia el norte y centro de la zona de estudio y ligeramente básicas (pH de 7.9) y neutras hacia el sureste (Figura 13).

Figura 13

pH del Sistema Acuífero del Miembro Superior de la Formación Los Santos.



Este modelo hidrogeológico conceptual corresponde a la primera propuesta a detalle (escala 1:25.000) del sistema acuífero localizado en el K₁lsms. De manera general, este sistema acuífero corresponde a cuerpos silisiclásticos fracturados, caracterizados por aguas subterráneas con flujos rápidos, donde, se habla por primera vez de la existencia de dos acuíferos (Somero y Superficial). La existencia de estos dos acuíferos se venía mostrando indirectamente en la diferencia marcada en los niveles estáticos registrados en los diferentes puntos de agua

subterráneas inventariados en los trabajos de Pinto et al. (2007) y Becerra y Parra (2016). Esto se confirma de manera clara en el actual inventario con los puntos A8 y P4 que, sin importar su cercanía (distancia aproximada de 35 m entre ellos), registran profundidades para el agua subterránea de 1.5 m y 39 m, respectivamente.

Cabe resaltar que aún se hace necesario precisar la extensión tanto lateral como vertical de los cuerpos que conforman el Acuífero Somero, lo cual podría lograrse con un estudio detallado de las características y propiedades de los perfiles de meteorización de las rocas del K₁lsms.

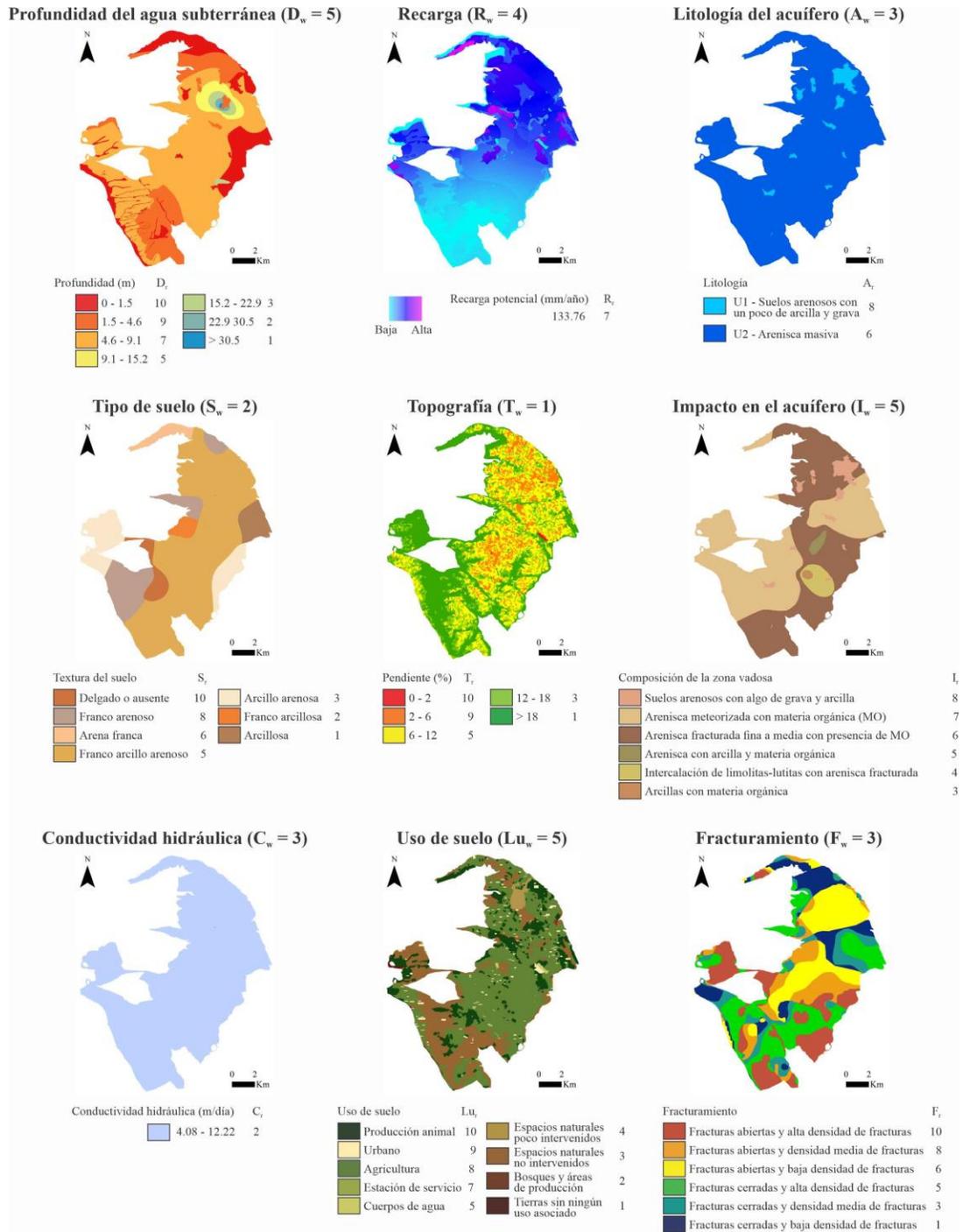
Las características y el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos de las aguas subterráneas (conductividad y pH) aquí presentadas son concordantes con lo reportado por Hincapié y Veloza (2009) en el informe hidrogeológico de la Mesa de Los Santos para esta zona específica. No obstante, se hace necesario una mayor densidad de puntos de monitoreo para caracterizar dichas propiedades individualmente para cada uno de los acuíferos aquí propuestos. De manera paralela, dichos puntos de monitoreo permitirían obtener datos adicionales que, analizados por expertos, podrían aclarar la hipótesis de conectividad de los cuerpos que conforman el Acuífero Somero y el Acuífero Superficial.

7.2 Análisis de la Vulnerabilidad

La distribución espacial y la calificación de los parámetros requeridos para el cálculo de la vulnerabilidad intrínseca del Sistema Acuífero del K₁lsms a través de los métodos DRASTIC y DRASTIC Modificado se resumen en la Figura 14 y se presentan en el Anexo K a escala 1:25.000.

Figura 14

Mapas de puntuación de los parámetros evaluados en los métodos *DRASTIC* y *DRASTIC Modificado*.



La profundidad del agua subterránea de la zona que define la capa *D* va desde la superficie hasta un máximo de 39.16 m, con predominio del rango de profundidad que va desde 4.6 m a 9.1 m (54.44%) la cual, según la metodología usada recibe una calificación de 7, siendo este valor alto e influyente en la determinación de la vulnerabilidad. El rango de profundidades más pequeñas (0 a 1.5 m) que califica una mayor vulnerabilidad según el parámetro de profundidad, tan solo representa el 18.17% de la zona y corresponde hacia el norte a la mayoría de las áreas donde se define el Acuífero Somero y a las zonas de humedales, mientras que al sur, corresponde a las áreas de influencia de los manantiales con sus zonas de drenajes.

En cuanto a *R*, el código SWB permitió estimar una recarga potencial de 133.76 mm/año en un periodo de análisis caracterizado por ser un año “lluvioso”, recibiendo así una calificación de 7.

Para la capa *A*, el 96.23% del total del área de estudio recibió una calificación de 6 ya que corresponde a las areniscas masivas del K_{11} sm donde se localizan las aguas del Acuífero Superior, mientras que el restante (3.77%) recibió una calificación de 8 correspondiendo a los suelos producto de la meteorización de dicha roca y que se caracterizan como suelos arenosos con un poco de grava y arcilla donde se localizan las aguas del Acuífero Somero.

En relación con *S*, el área presenta suelos con texturas que van desde franco arenosas hasta Arcillosas, siendo predominantes los suelos franco-arenosos-arcillosos, que cubren un 60.52% de la totalidad del área y que, por su capacidad intermedia de retener contaminantes, recibieron una calificación de 5. Los suelos que por su capacidad de retener contaminantes recibieron la menor calificación para la vulnerabilidad (1) son suelos arcillosos, localizados al este, abarcando un 4.6% del total del área. Las zonas sin desarrollo de suelo en el sector suroeste recibieron una calificación

de máxima vulnerabilidad (10) ya que en estas condiciones no ofrecen al sistema algún tipo de amortiguación o protección en cuanto a la movilidad de contaminantes.

En cuanto a *T*, 0.17% del área presenta pendientes entre el 0% al 2%, 13.03% del área arrojó pendientes en el rango de 2% al 6% y 33.35% presenta pendientes entre el 6% y el 12%, recibiendo calificaciones para vulnerabilidad de 10, 9 y 5 respectivamente, mostrando así una buena extensión de zonas adecuadas para la infiltración de agua y sustancias contaminantes a los acuíferos. El área restante presenta pendientes clasificadas en el rango del 12 al 18% (con una extensión del 17.28%) y mayores al 18% (con una extensión del 36.17%) que recibieron calificaciones para vulnerabilidad de 3 y 1 respectivamente.

Para la capa *I*, un 0.39% del área obtuvo calificación de 3 ya que corresponde a zonas arcillosas con materia orgánica. El 3.31% fue calificado en 4, correspondiente a intercalación de limolitas-lutitas con areniscas fracturadas. El 1.04% fue calificado en 5 ya que corresponde a areniscas con arcilla y materia orgánica. El 46.55% fue calificado en 6 por tratarse de areniscas finas a medias fracturadas con presencia de materia orgánica. El 44.94% fue calificado en 7 por ser areniscas meteorizadas con materia orgánica. Finalmente, el 3.77% restante fue calificado en 8 correspondiendo a suelos arenosos con algo de grava y arcilla.

En cuanto a la capa *C*, los valores de conductividad hidráulica disponibles para el área de estudio son limitados, contando únicamente con la información de 4 pruebas de bombeo ($K_{PC1} = 6.491$ m/día; $K_{PC27} = 0.0243$ m/día; $K_{PC29} = 0.005$ m/día; $K_{PC38} = 1.028$ m/día) cuyos valores están en el rango típico de materiales fracturados y meteorizados (Sinthal & Gupta, 2010) y que según la metodología podrían calificarse con vulnerabilidades de 1 y 2. Sin embargo, debido a las características hidrogeológicas en la zona de tipo fracturado, se optó por calificar la totalidad del área con el número mayor (2).

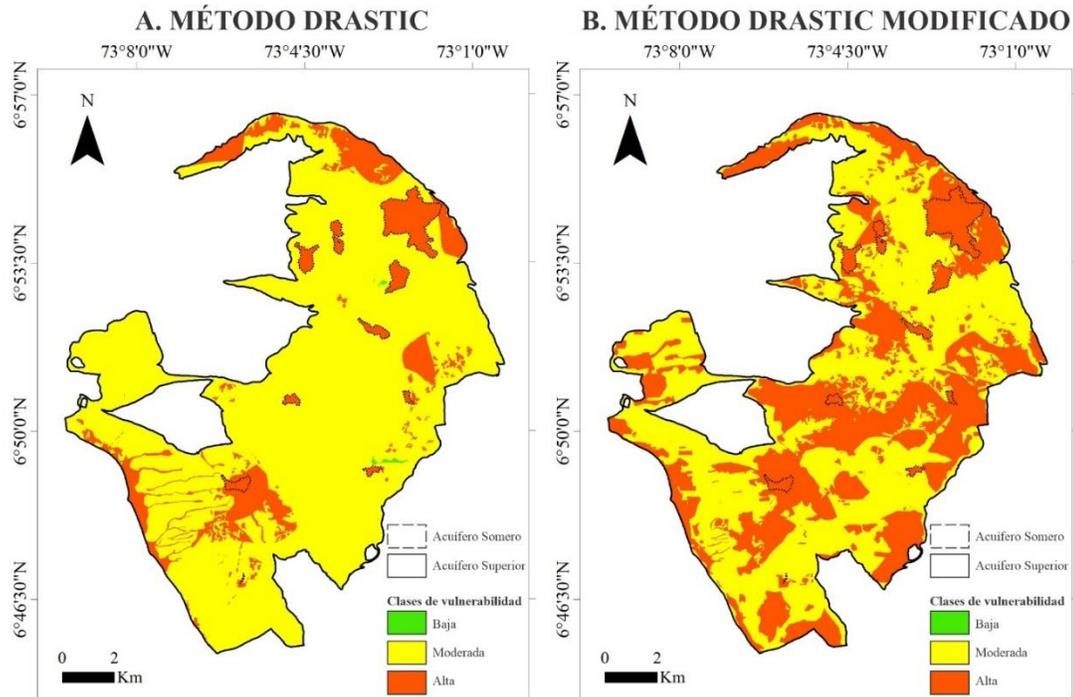
En cuanto a *Lu*, en la zona predominan las áreas destinadas a la agricultura (52.87%) y un porcentaje significativo (16.21%) corresponde a zonas destinadas para la producción animal. Estas zonas recibieron calificaciones altas para vulnerabilidad (8 y 10 respectivamente) como sugiere Jenifer & Jha (2018) debido a que conllevan a operaciones de labranza que mejoran el movimiento de agua, y por tanto, de contaminantes hacia los acuíferos subyacentes a través de la zona vadosa.

Finalmente, debido a que las características del fracturamiento (densidad y zonas con fracturas abiertas o cerradas) reportadas por Díaz et al. (2009) presentan distribuciones heterogéneas esto se reflejó en el comportamiento del parámetro F. Así, el 12.29% del área recibió una calificación de 1 (densidad baja de fracturas cerradas), el 11.44% recibió una calificación de 3 (densidad media de fracturas cerradas), el 22.78% recibió una calificación de 5 (alta densidad de fracturas cerradas), el 20.88% recibió una calificación de 6 (baja densidad de fracturas abiertas), el 13.35% recibió una calificación de 8 (densidad media de fracturas abiertas). El 19.25% restante recibió una calificación de 10 (alta densidad de fracturas abiertas), y estuvo ubicada predominantemente en el sector sur.

Una vez aplicadas las fórmulas de vulnerabilidad, los métodos DRASTIC y DRASTIC Modificado clasifican el área de estudio en 3 de las 5 categorías de vulnerabilidad propuestas para cada método, correspondientes a bajo, moderado y alto (Figura 15 y Tabla 7).

Figura 15

Mapas de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del Sistema Acuífero del Miembro Superior de la Formación Los Santos.



*Nota. Sistema de referencia espacial MAGNA Colombia Bogotá. Mapa a escala 1:25.000 disponible en el Anexo L.

Tabla 7

Áreas por clase de vulnerabilidad usando los métodos DRASTIC y DRASTIC Modificado.

Categoría	DRASTIC		DRASTIC MODIFICADO	
	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%
Muy Bajo	0.000	0.00	0.00	0.00
Bajo	0.177	0.11	0.004	0.00
Moderado	134.013	85.16	89.671	56.98
Alto	23.175	14.73	67.690	43.01
Muy Alto	0.00	0.00	0.00	0.00
Área Total	157.365	100.00	157.365	100.00

7.2.1 Método DRASTIC

La mayor área categorizada por el método DRASTIC es de vulnerabilidad moderada (85.16%), seguida por vulnerabilidad alta (14.73%) y finalmente vulnerabilidad baja (0.11%) (ver Tabla 7).

Todas las áreas de vulnerabilidad moderada corresponden a zonas del Acuífero Superior. En el norte de la zona estudio, estas áreas de vulnerabilidad moderada se caracterizan por niveles estáticos muy cercanos a la superficie (<1.5 m), una zona vadosa compuesta de areniscas finas a medias fracturadas o meteorizadas con presencia de materia orgánica, suelos francos arcillo arenosos y pendientes entre el 6% al 18%. Hacia el sur, las áreas de vulnerabilidad moderada se caracterizan por niveles estáticos poco profundos (<4.6 m), zona vadosa compuesta de areniscas finas a medias fracturadas o meteorizadas con presencia de materia orgánica, suelos francos arcillo arenosos y arcillo arenosos, con pendientes mayores al 12%. En la zona media, las áreas de vulnerabilidad moderada están representadas por sectores con amplios rangos de profundidades del nivel estático, variabilidad de materiales en la zona vadosa (suelos franco-arcillosos, francos arcillosos y arcillo arenosos) y un amplio rango de pendientes (0% en las zonas más planas hasta 482% en los bordes de escarpe).

Por otro lado, las áreas de vulnerabilidad alta corresponden a la totalidad del Acuífero Somero, caracterizado por niveles estáticos muy cercanos a la superficie (<4.6 m), una zona vadosa compuesta de suelos arenosos con algunas gravas y arcillas, suelos en su mayoría de textura franco arcillo arenosa y ocasionalmente arcillo arenosa, franco arenoso o con ausencia de suelo, con diversidad de pendientes (0% - 60%). Así mismo, las áreas de vulnerabilidad alta cuentan con áreas del Acuífero Superior que hacia el norte presenta niveles estáticos inferiores a los 1.5 m, una zona vadosa compuesta de areniscas finas a medias fracturadas o meteorizadas con presencia de

materia orgánica, suelos francos arcillosos arenosos y francos arenosos, en zonas con un amplio rango de pendientes (0° en las zonas más planas hasta 78° en los bordes de escarpe). Hacia el sur, las zonas de vulnerabilidad alta del Acuífero Superior tienen niveles estáticos inferiores a los 1.5 m, con una zona vadosa compuesta por areniscas meteorizadas con materia orgánica, suelos franco arenosos y todos los rangos de pendientes, donde predominan zonas con pendientes mayores a 18%. Hacia la parte media, las zonas de vulnerabilidad alta presentan niveles estáticos menores a los 9.1 m, suelos arcillosos y franco arcillo arenosos y pendientes predominantemente inferiores al 12%.

El área categorizada como vulnerabilidad baja, que es casi despreciable corresponde a una pequeña zona del Acuífero Superior - K₁lms, localizada en el centro norte, caracterizada por niveles estáticos profundos (> 22.9 m), una zona vadosa que presenta areniscas finas a medias fracturadas o meteorizadas con presencia de materia orgánica, suelos francos arcillo arenosos y pendientes entre 4% y 25%.

7.2.2 Método DRASTIC Modificado

Al aplicar el método DRASTIC Modificado, la mayor área se clasifica como vulnerabilidad moderada (56.98%), seguida por la vulnerabilidad alta (43.01%) y finalmente vulnerabilidad baja (0.002%) (Ver Tabla 7).

Las áreas de vulnerabilidad moderada son zonas del Acuífero Superior con usos de suelo sin actividades antrópicas o con actividades antrópicas de impacto bajo-medio, donde se incluyen las áreas sin vegetación o sin uso asociado, bosques y áreas designadas para protección, áreas naturales no intervenidas, poco intervenidas o transformadas, y los cuerpos de agua naturales y artificiales.

Las áreas de vulnerabilidad alta corresponden a la totalidad de áreas del Acuífero Somero y áreas del Acuífero Superior, condicionadas por usos de suelo relacionados con actividades antrópicas de alto impacto como estaciones de gasolina, agricultura, zonas de viviendas urbanas y producción animal.

El área clasificada como vulnerabilidad baja, coincide con una fracción del área de vulnerabilidad baja categorizado por el método DRASTIC original, cuyo nivel estático es superior a 22.9 m, combinado con un uso de área natural no intervenida y una zona de baja densidad de fracturas abiertas.

Estos resultados muestran que las categorías de vulnerabilidad definidas por el DRASTIC Modificado estuvieron altamente influenciadas por el parámetro de uso de suelo (Lu) y en menor proporción del parámetro de características del fracturamiento (F), mostrando una relación directamente proporcional de la vulnerabilidad con el impacto de las actividades antrópicas en los usos de suelo en toda el área de estudio (a mayor impacto, mayor categoría de vulnerabilidad) sin importar la configuración que genera para cada sector las características del fracturamiento.

Sin embargo, debido a que el fracturamiento configura la vía principal para el transporte de contaminantes a la capa freática como lo indica de Souza et al. (2022), Jenifer & Jha (2018), y Sarikhani et al. (2014), su inclusión en el DRASTIC Modificado debería influenciar con mayor impacto la evaluación de la vulnerabilidad tal como lo reportan los estudios de Jenifer & Jha, (2018), Abdullah et al. (2015), Awawdeh & Jaradat (2010) y Mendonza & Barmen (2006). Por lo cual, se hace necesario en estudios posteriores replantear la manera de evaluar este parámetro en el área de estudio, ya sea definiendo una nueva manera de analizar el parámetro (evaluando únicamente la densidad del fracturamiento como en de Souza et al. (2022) o mediante la distancia a las fracturas como en Sener & Davraz (2013)), modificando el valor de F_x a 5 como en de Souza

et al. (2022) y Jenifer & Jha (2018) o modificando todos los pesos (w) y tasas de los parámetros (r) apoyados en técnicas como por ejemplo el proceso de Jerarquía Analítica que aplica Sener & Davraz (2013).

7.2.3 Comparación entre los métodos DRASTIC y DRASTIC Modificado

DRASTIC Modificado en comparación con DRASTIC original presenta disminuciones en las clases de vulnerabilidad baja (disminución de un 0.11%) y moderada (disminución de un 28.18%) que se suman a la clase de vulnerabilidad alta (aumento del 28.28%) (ver Tabla 7). Este comportamiento refleja la alta influencia del parámetro Lu en contraste con la influencia del parámetro F y es similar a lo reportado en estudios como los de de Souza et al. (2022), Jenifer & Jha (2018) y Sener & Davraz (2013).

Estas diferencias entre el DRASTIC original y el DRASTIC Modificado eran de esperarse, ya que como plantea Jenifer & Jha (2018), el DRASTIC original subestima en gran medida la vulnerabilidad debido a que ignora los impactos antropogénicos y la influencia de las fracturas en zonas con alta densidad poblacional y con control estructural. Por lo tanto, DRASTIC Modificado presenta un mejor ajuste de la vulnerabilidad de aguas subterráneas con respecto a la realidad tanto en área como en distribución.

Basados en lo anterior, se recomienda, al igual que en Agudelo et al. (2020), Awawdeh et al. (2020), Chamanepour et al. (2020) y Jones et al. (2019), modificar los métodos originales para la estimación de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea mediante la adición de capas que configuran características propias del área a estudiar. Para esto, se requiere un modelo hidrogeológico conceptual de partida apropiado, construido con insumos de calidad, pues estos condicionan la calidad de los resultados (MADS, 2014). Un modelo hidrogeológico conceptual

deficiente conlleva a la categorización de áreas de vulnerabilidad erróneas, que podrían ser sobrevaloradas o subvaloradas, como es el caso de la vulnerabilidad reportada por Ingeoexploraciones – CAS (2016) para esta área de estudio. En el mencionado estudio, el punto de partida es un modelo hidrogeológico poco detallado que, al aplicar el método GOD de vulnerabilidad, genera áreas con categorías baja con tendencia a moderada, que no reflejan de manera suficiente la realidad de la zona de estudio.

7.3 Validación de la vulnerabilidad a partir del Nivel de Fondo Químico Natural (NBL)

Los valores de NBL y la estadística básica ajustada de la concentración de cada uno de los iones indicadores de contaminación en el agua subterránea para los acuíferos localizados en el K1lsms se muestran en las Tabla 8 y 9. La estadística detallada de los ajustes de distribución de probabilidad de estos iones para cada acuífero se presenta en el Anexo M.

Tabla 8

Nivel de Fondo Químico Natural y estadística básica de las concentraciones de iones indicadores de contaminación contenidos en las aguas subterráneas del Acuífero Somero.

Iones	Acuífero Somero			
	NO ₃ ⁻ (mg/L)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)
REF	10	0.5	250	10
Distribución	Weibull de 3 parámetros	Weibull	Weibull	Exponencial
NBL (90%)	2.12	0.046	26.77	7.45
N° Muestras	10	12	13	6
Mínimo	0.50	0.01	0.07	1.40
Máximo	4.70	0.10	44.80	9.40
Promedio	1.24	0.02	9.91	3.23
Mediana	0.75	0.01	0.07	1.40

DE	1.29	0.03	16.16	3.25
Q1	0.50	0.01	0.07	1.40
Q3	1.55	0.02	17.47	5.65

*Nota. REF: valor de referencia; DE: desviación estándar; Q1: cuartil 1; Q3: cuartil 3

Tabla 9

Nivel de Fondo Químico Natural y estadística básica de las concentraciones de iones indicadores de contaminación contenidos en las aguas subterráneas del Acuífero Superior.

Iones	Acuífero Superior			
	NO ₃ ⁻ (mg/L)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)
REF	10	0.5	250	10
Distribución	Weibull	Weibull	Weibull	Lognormal
	de 3 parámetros			
NBL (90%)	3.17	0.17	5.06	5.34
N° Muestras	24	26	26	23
Mínimo	0.50	0.01	0.07	0.50
Maximo	7.30	0.25	32.30	9.40
Promedio	1.35	0.06	2.78	2.85
Mediana	0.50	0.02	0.07	1.40
DE	2.07	0.08	7.61	2.17
Q1	0.50	0.01	0.07	1.40
Q3	0.68	0.11	1.10	4.00

*Nota. REF: valor de referencia; DE: desviación estándar; Q1: cuartil 1; Q3: cuartil 3

El nitrato (NO₃⁻), según la distribución de probabilidad ajustada, presenta valores de NBL de 2.1 mg/L para las aguas del Acuífero Somero y de 3.2 mg/L para las aguas del Acuífero Superior. Estas líneas base definidas para el NO₃⁻ se superan en época de lluvia en un 63.64% del área hacia el norte y suroeste, aumentando 1.5% en la cobertura de concentración anómala de este ion en la época seca (Tabla 10). Estos altos niveles de NO₃⁻ sugieren presión antrópica como indican Aragão et al. (2020), Zhang (2018) y Müller et al. (2006), relacionado principalmente con

actividades agrícolas (uso de pesticidas y fertilizantes químicos en cultivos de café, tomate, tabaco maíz y piña) y desechos de las zonas urbanizadas (contaminación fecal por sistemas sépticos y fertilizantes para césped y compuestos nitrogenados en el aire producidos por automóviles e industrias). Los impactos antrópicos en la zona son tan fuertes que incluso algunos puntos muestreados rebasan los límites de potabilidad de agua (A1, A5, A7, A29 y P2 en época lluviosa y de manera adicional A15, A23 y A26 en época seca).

Tabla 10

Proporción de áreas ocupadas por cada clase de vulnerabilidad DRASTIC donde se superan los Niveles de Fondo Químico Natural para iones indicadores de contaminación en época lluviosa y época seca.

METODO DRASTIC								
Clase de vulnerabilidad	NO ₃ ⁻		PO ₄ ³⁻		SO ₄ ²⁻		Cl ⁻	
	Lluviosa	Seca	Lluviosa	Seca	Lluviosa	Seca	Lluviosa	Seca
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Bajo	0.050	0.124	0.000	0.000	0.093	0.174	0.113	0.113
Moderado	81.56	85.14	73.89	77.52	84.27	83.42	85.160	85.160
Alto	18.39	14.73	26.11	22.48	15.64	16.41	14.730	14.730
MÉTODO DRASTIC MODIFICADO								
Bajo	0.004	0.003	0.000	0.000	0.005	0.004	0.002	0.002
Moderado	59.50	57.18	31.88	55.36	52.06	57.06	56.980	56.980
Alto	40.50	42.82	68.12	44.64	47.94	42.94	43.010	43.010

Comparado las áreas superadas de los NBL del ion NO₃⁻ con el mapa de vulnerabilidad obtenido por el método DRASTIC original (Figura 16), en época de lluvia hay una coincidencia de niveles superados de los NBL del ion NO₃⁻ del 81.56% con la categoría de vulnerabilidad moderada, del 18.39% con la categoría de vulnerabilidad alta y del 0.050% con la categoría de vulnerabilidad baja. En época seca, las áreas que superan los NBL del NO₃⁻ coinciden con el

85.14% de la vulnerabilidad moderada y en un 14.73% y 0.124% con las vulnerabilidades alta y baja respectivamente (ver Tabla 10).

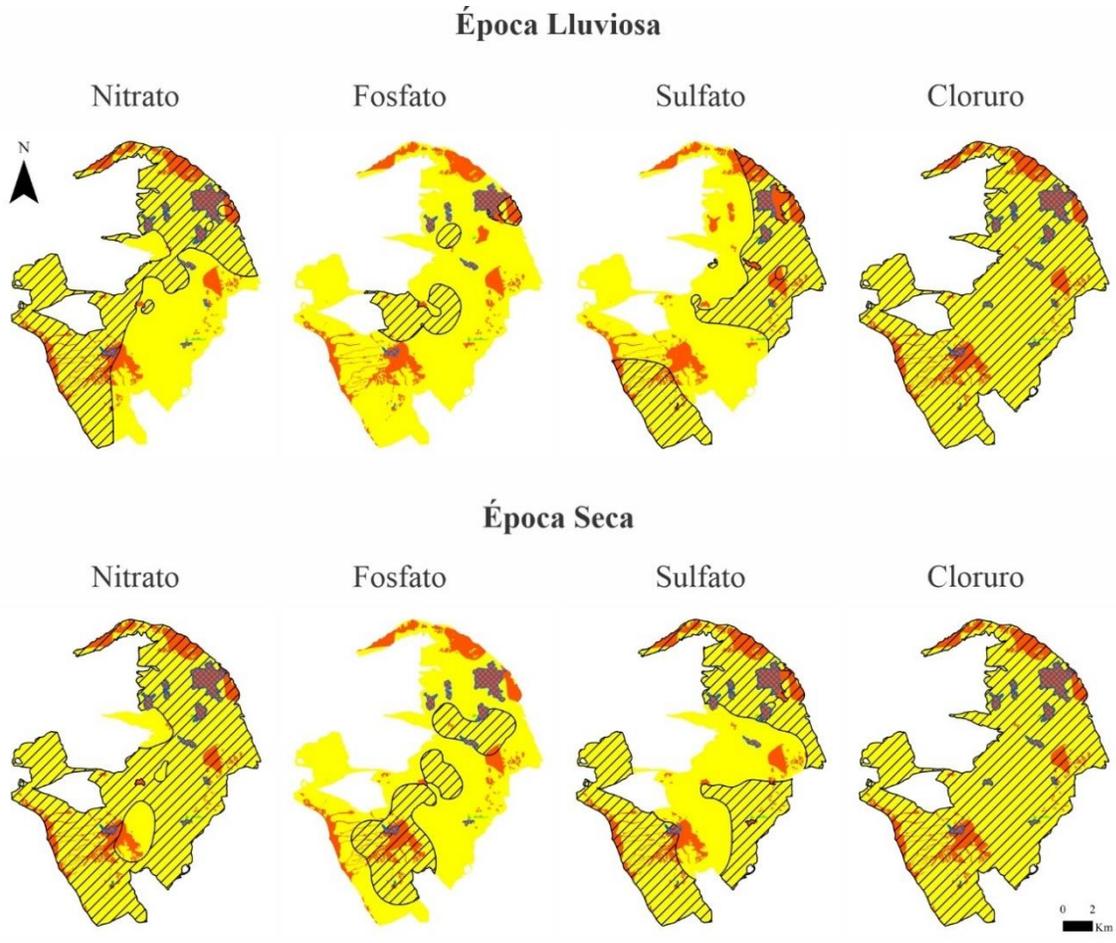
Comparando las áreas superadas de los NBL del ion NO_3^- con el mapa de vulnerabilidad obtenido por el método DRASTIC Modificado (Figura 17), en época de lluvia, las áreas que superan los NBL del NO_3^- coinciden en un 59.50% con la vulnerabilidad moderada, seguido por la vulnerabilidad alta y la baja con un 40.50% y un 0.004% respectivamente. En época seca, la coincidencia entre las áreas que superan los NBL del NO_3^- con cada categoría de vulnerabilidad del DRASTIC Modificado es del 57.18% para categoría moderada, seguido por la alta con un 42.82% y finalmente la baja con un 0.003% (Tabla 10).

Para el fosfato (PO_4^{3-}), según la probabilidad ajustada, se presentan valores de NBL del 0.046 mg/L para las aguas del Acuífero Somero y de 0.17 mg/L para las aguas del Acuífero Superior. Estas líneas base definidas para el PO_4^{3-} se superan en el área de estudio en un 14.44% en época de lluvia y en un 31.25% en época seca, indicando un aumento del área con concentraciones anómalas del ion PO_4^{3-} en la época seca del 2.2%.

Los niveles superados de los NBL del ion PO_4^{3-} sugieren áreas contaminadas por actividades agropecuarias, ya que, como indica Domagalski & Johnson (2012), el ion PO_4^{3-} puede agregarse al suelo mediante el uso de fertilizantes químicos, estiércol y materiales compostados, siendo razonable que se supere el NBL en áreas donde existe actividad agrícola como lo encontrado en los estudios de Aragão et al. (2020) y Lucon et al. (2018). Adicionalmente, en los puntos muestreados se encontraron resultados que superan los límites de potabilidad (A28 y P2 en época lluviosa y P5 en época seca).

Figura 16

Áreas donde las concentraciones de iones indicadores de contaminación superan sus NBL en época de lluvia y época seca y su comparación con el mapa de vulnerabilidad obtenido por el método DRASTIC.



LEYENDA

Tipo de acuífero

-  Acuífero somero
-  Acuífero superior

Clases de vulnerabilidad

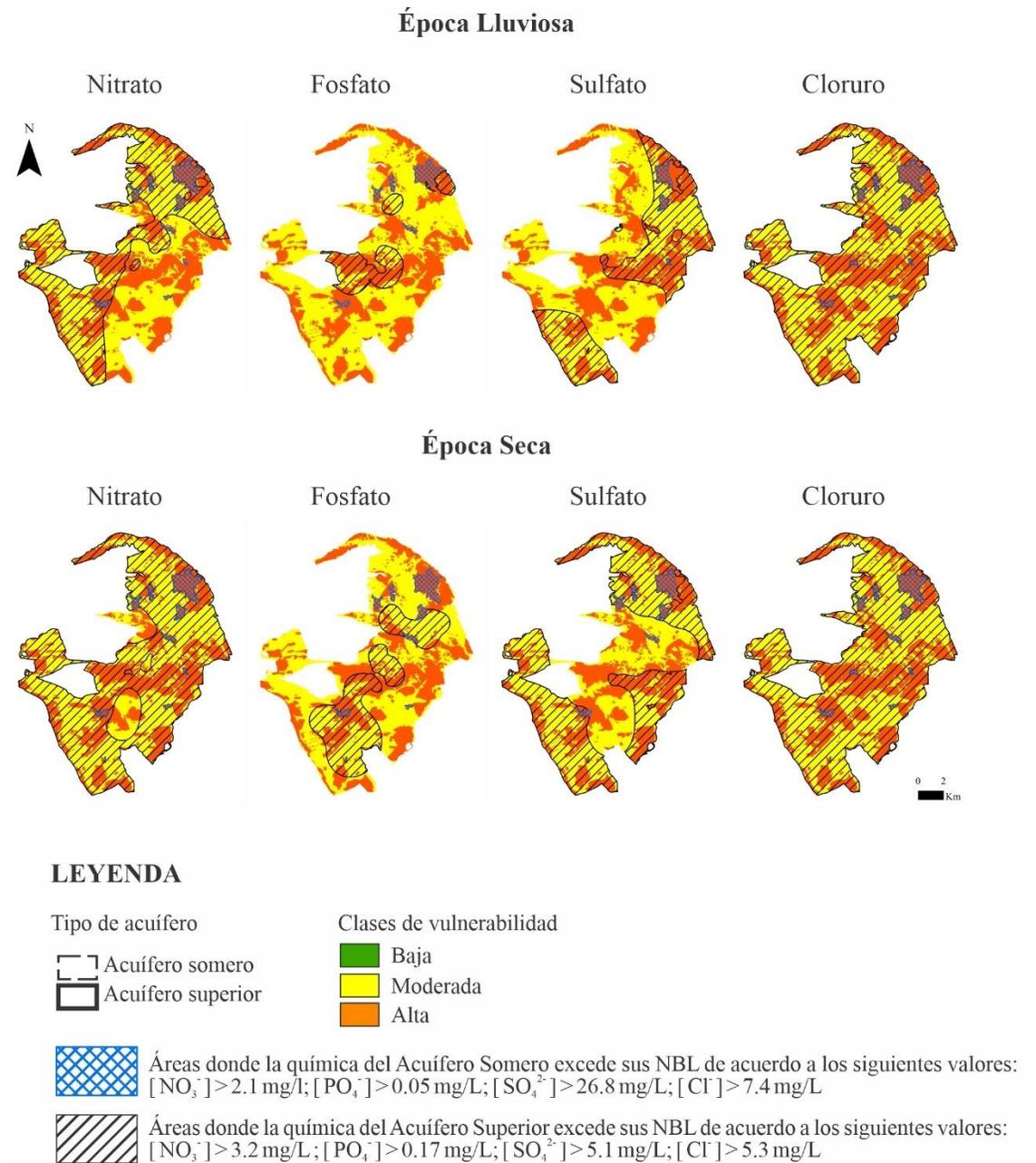
-  Baja
-  Moderada
-  Alta

 Áreas donde la química del Acuífero Somero excede sus NBL de acuerdo a los siguientes valores: $[NO_3^-] > 2.1 \text{ mg/l}$; $[PO_4^{3-}] > 0.05 \text{ mg/L}$; $[SO_4^{2-}] > 26.8 \text{ mg/L}$; $[Cl^-] > 7.4 \text{ mg/L}$

 Áreas donde la química del Acuífero Superior excede sus NBL de acuerdo a los siguientes valores: $[NO_3^-] > 3.2 \text{ mg/L}$; $[PO_4^{3-}] > 0.17 \text{ mg/L}$; $[SO_4^{2-}] > 5.1 \text{ mg/L}$; $[Cl^-] > 5.3 \text{ mg/L}$

Figura 17

Áreas donde las concentraciones de iones indicadores de contaminación superan sus Niveles de Fondo Químico Natural en época de lluvia y época seca y su comparación con el mapa de vulnerabilidad obtenido por el método DRASTIC Modificado.



Comparando las áreas donde se supera los NBL del ion PO_4^{3-} con el mapa de vulnerabilidad obtenido por el método DRASTIC original (Figura 16), para la época de lluvia, se encontró una coincidencia de áreas superadas de los NBL del ion PO_4^{3-} con el 73.89% y 26.11% de las categorías de vulnerabilidad moderadas y alta, y para la época seca, una coincidencia de áreas superadas de los NBL del ion PO_4^{3-} con las categorías de vulnerabilidad moderada y alta del 77.52% y 22.48% respectivamente (Tabla 10).

Comparando las áreas donde se supera los NBL del ion PO_4^{3-} con el mapa de vulnerabilidad obtenido por el método DRASTIC Modificado (Figura 17), la coincidencia de las áreas donde se superan los NBL del ion PO_4^{3-} con las diferentes categorías de vulnerabilidad en época lluviosa corresponden al 68.12% con la categoría alta y del 31.88% con la categoría baja. En época seca, la coincidencia de las áreas donde se superan los NBL del ion PO_4^{3-} con las diferentes categorías de vulnerabilidad es del 55.36% para la categoría moderada y del 44.64% para la categoría alta (Tabla 10).

Respecto al ion sulfato (SO_4^{2-}), el NBL ajustado a la mejor distribución presenta un valor de 26.8 mg/L para las aguas del Acuífero Somero y un valor de 5.1 mg/L para las aguas del Acuífero Superior. Aunque estas concentraciones presentan rangos normales respecto a lo establecido por la metodología seguida (valores de $\text{SO}_4^{2-} < 250$ mg/L), el valor obtenido como NBL en el Acuífero Somero es demasiado alto para considerarse como derivado de fuentes naturales considerando las litologías silisiclásticas que conforman el Miembro Superior de la Formación Los Santos según las evidencias en la revisión de columnas estratigráficas. Sin embargo, esta alta concentración podría explicarse como un aporte litológico natural si se confirma la existencia de capas de yeso que se reportan como único caso en el informe de perforación del pozo 4 (P4), lo que, además, sugeriría un cambio importante en la interpretación del ambiente

sedimentario del Miembro Superior de la Formación Los Santos, el cual dejaría de caracterizar un ambiente continental a caracterizar uno más de tipo transicional. Debido a esto, se requieren a futuro estudios más detallados que permitan comprender esta condición.

Adicionalmente, partiendo de un origen natural del ion SO_4^{2-} , se plantea que la marcada diferencia de concentración en los dos cuerpos acuíferos puede ser explicada por un pH en general ácido (4.8 a 6.4 pH) de las aguas de Acuífero Somero con niveles muy cercanos a la superficie que favorecen la retención del sulfato en los primeros metros del suelo (Ramírez, 1974).

Los NBL del ion SO_4^{2-} establecen una línea base que, para época de lluvia es superada en áreas importantes hacia noreste, centro este y suroeste, abarcando el 41.25% de la totalidad de la zona de estudio y presentando un aumento para la época seca del 1.6%. Así, se obtienen áreas donde se supera el NBL del ion SO_4^{2-} en un 64.88% del total de la zona (ver Tabla 10).

Las áreas donde las concentraciones del ion SO_4^{2-} son mayores a la línea base establecida por sus NBL reflejarían la influencia de los residuos domésticos de las áreas urbanizadas y los residuos industriales de los sectores comerciales en concordancia a lo establecido en estudios como los de Aragão et al. (2020) y USGS (2016). Sin embargo, los valores aquí obtenidos para la hidroquímica fueron menores que los niveles de referencia de uso de agua para consumo humano. Por lo tanto, a pesar de la alta distribución de niveles donde se superan los NBL del ion SO_4^{2-} , estos no son suficientes para alterar el potencial para este uso del agua.

Con respecto al método DRASTIC original (Figura 16), en época de lluvia la coincidencia de las categorías de vulnerabilidad con las áreas donde se supera los NBL del ion SO_4^{2-} es de un 84.27% para la vulnerabilidad moderada, seguida por un 15.64% y un 0.093% para la vulnerabilidad alta y baja respectivamente. En época seca, la coincidencia de las categorías de vulnerabilidad con las áreas donde se supera los NBL del ion SO_4^{2-} es de un 83.42% para la

vulnerabilidad moderada, un 16.41% para la vulnerabilidad alta y tan solo un 0.174% para la vulnerabilidad baja (Tabla 10). Ahora, con respecto al DRASTIC Modificado (Figura 17), tanto para época de lluvia como época seca, se encontró una mayor coincidencia de las áreas donde se supera los NBL del ion SO_4^{2-} con las categorías de vulnerabilidad moderada, 52.06% y 57.06% respectivamente, seguido por la coincidencia dada para las áreas donde se supera los NBL del ion SO_4^{2-} con las categorías alta (47.94% y 42.94%) y baja (0.005% y 0.004%).

Finalmente, en relación con el ion cloruro (Cl^-), los NBL ajustados a la mejor distribución arrojaron valores de 7.45 mg/L para las aguas del Acuífero Somero y de 5.34 mg/L para las aguas del Acuífero Superior.

Estos NBL del ion Cl^- establecen una línea base que es superada en toda el área de estudio en época lluviosa y seca. Sin embargo, las concentraciones de los puntos muestreados no exceden los valores máximos aceptados en aguas para el consumo humano (250 mg/L).

La totalidad de la zona con áreas superadas para los NBL del ion Cl^- sugiere una amplia contaminación por actividades agrícolas (uso de fertilizantes químicos en zonas de cultivos) y las zonas urbanas (aguas domésticas residuales y uso de ablandadores de agua) de manera similar a los estudios realizados por Aragão et al. (2020).

Debido a lo anterior, las áreas donde se superan los NBL del ion Cl^- comparada con las categorías de vulnerabilidad obtenidas por el método DRASTIC original, en época seca y lluviosa, presentan una mayor coincidencia con la vulnerabilidad moderada con un 85.16% de cobertura para el área, seguido por un 14.73% para la vulnerabilidad alta y un 0.0113% para la vulnerabilidad baja. Con respecto al método DRASTIC Modificado, la coincidencia de las áreas donde se superan los NBL del ion Cl^- es mayor con la vulnerabilidad moderada con un 56.98%, seguido por la

vulnerabilidad alta con un 43.01%, y una coincidencia despreciable para la vulnerabilidad baja (0.002%) (Tabla 10).

Partiendo de la condición metodológica donde se establece que, el método que mejor representa la realidad de la vulnerabilidad a la contaminación de aguas subterráneas es el que muestre una mayor coincidencia de la clase de vulnerabilidad alta o muy alta con las áreas donde se rebasa el NBL para los iones de NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} y Cl^- (Aragão et al., 2020), encontramos que el método DRASTIC Modificado presenta un mayor ajuste, principalmente por integrar la capa de uso de suelo Lu , un parámetro que permite evaluar de manera efectiva el impacto causado por las actuales actividades antrópicas en la zona de estudio como indica Jenifer & Jha (2018).

Debido a que los mapas de vulnerabilidad son una herramienta importante en la identificación de áreas naturalmente sensibles a la contaminación por actividades antrópicas (de Souza et al., 2022; Aragón et al., 2020; Duhalde et al., 2018), la clasificación de un territorio con vulnerabilidades moderadas y altas como lo hace este estudio a través del DRASTIC Modificado debe crear una alerta importante para la planificación municipal con restricciones en el uso del suelo con respecto a las diferentes actividades que ya han sido identificadas como generadoras de contaminantes (Romero y Urrea, 2021).

El aumento de áreas donde se superan los NBL para cada ion indicador de contaminación en la época seca (1.5% para NO_3^- , 2.2% para PO_4^{3-} y 1.6% para SO_4^{2-}) muestra una influencia de la estacionalidad, con una proporcionalidad inversa entre la cantidad de lluvia y la concentración iónica - a mayor cantidad de agua, menor concentración iónica (en época de lluvia), y a menor cantidad de agua, mayor concentración iónica (época seca). Este fenómeno se conoce como efecto de dilución, y es reportado por autores como Schenone et al. (2007).

Adicionalmente, se observa que las áreas delimitadas para los Acuíferos Someros representan áreas donde de manera continua se superan los NBL de los iones indicadores de contaminación (NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} y Cl^-), mostrando que los acuíferos menos profundos rara vez presentan niveles de concentración naturales, mientras que los más profundos pueden estar libres de impacto humano (Lucon et al. 2018; Vázquez-Suñé et al., 2005; Müller et al., 2006).

La amplia distribución de las áreas donde se supera los NBL de los iones indicadores de contaminación (NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} y Cl^-) confirma que la presencia de áreas altamente antropizadas, donde se desarrollan actividades agrícolas, agropecuarias, industriales y domésticas, influye adversamente sobre la calidad de las aguas subterráneas (Aragão et al., 2020; Lucon et al., 2018; Ossa & Betancurt, 2018; Sener & Davraz, 2013; Fritzsos et al., 2009; Appelo & Postma, 2005; Fritzsos et al., 2003; Fritzsos, 2003).

Finalmente, los NBL aquí propuestos para el Sistema Acuífero del Miembro Superior de la Formación Los Santos, al representar aguas sin ninguna traza de impacto humano (Hernández y Custodio, 2004) proporcionan una línea base que debe ser considerada por las autoridades ambientales y reguladoras en los sistemas de monitoreo de calidad de aguas subterráneas.

8. Conclusiones

Objetivo específico 1:

El Miembro Superior de la Formación Los Santos (K₁lsmS) presenta dos unidades hidrogeológicas acuíferas que conforman el llamado Sistema Acuífero del Miembro Superior. La primera unidad se denomina Acuífero Somero (U1), de tipo libre, planteado como un reservorio discontinuo cuyas aguas se localizan hacia el norte en perfiles de meteorización y en el sur en zonas de mayor fracturamiento, guardando una estrecha relación con los humedales presentes. La segunda unidad se denomina Acuífero Superior (U2) de tipo libre, localmente semiconfinado y fracturado, con flujos en dirección este-oeste y donde la porosidad secundaria definida por las fracturas domina el almacenamiento y la producción del agua subterránea. Estas unidades acuíferas más superficiales (U1 y U2) están separadas del sistema acuífero más profundo por la unidad hidrogeológica U3 que configura una barrera impermeable a partir de las rocas arcillosas del Miembro Medio de la Formación Los Santos (K₁lsmM).

Las aguas subterráneas del Sistema Acuífero del Miembro Superior de la Formación Los Santos arrojan valores de conductividad eléctrica baja (9 - 281 $\mu\text{S}/\text{cm}$) soportando la hipótesis de una relación directa con las aguas superficiales y una circulación por las fracturas que implica recorridos y tiempos de permanencia cortos, causando baja concentración de sólidos y sales disueltas debido al flujo local.

El pH de las aguas subterráneas presenta valores aceptables, con aguas ácidas (pH de 4.8 y 5.6) y ligeramente ácidas (pH de 6.4) hacia el norte y centro de la zona de estudio y ligeramente básicas (pH de 7.9) y neutras hacia el sureste.

Objetivo específico 2:

La caracterización de los parámetros requeridos para aplicar los métodos de análisis de vulnerabilidad DRASTIC original y DRASTIC Modificado arrojó que la zona de estudio presenta:

- i) niveles piezométricos (D) que van desde los 0 m hasta los 39.16 m, con predominio del rango de profundidades que van desde los 4.6 m a los 9.1 m;
- ii) recarga potencial (R) para un año “lluvioso” de 133.76 mm/año;
- iii) litologías acuíferas (A) definidas por los perfiles de meteorización de las rocas del Miembro Superior de la Formación los Santos para el Acuífero Somero y las areniscas masivas cementadas y fracturadas para el Acuífero Superior;
- iv) suelos (S) con texturas que van desde franco arenosas hasta arcillosas, siendo predominantemente franco-areno-arcillosas;
- v) pendientes (T) en su mayoría ubicadas en el rango de 0% a 12%, indicando presencia de áreas adecuadas para la infiltración de agua y sustancias contaminantes;
- vi) zona vadosa (I) que para las áreas del Acuífero Somero presenta suelos arenosos con algo de grava y arcilla y para las áreas del Acuífero Superior presenta predominantemente areniscas meteorizadas o fracturadas con presencia de materia orgánica y en menor proporción, intercalación de limolitas-lutitas con arenisca fracturada y arcillas con materia orgánica;
- vii) conductividad hidráulica (C) en el rango de 10^{-3} m/día y 10^1 m/día típico de acuíferos en areniscas fracturadas y de material rocoso fracturado y meteorizado;
- viii) usos de suelo (Lu) con áreas destinadas principalmente a la agricultura, acompañado de una amplia expansión urbana; y
- ix) características del fracturamiento (F) con distribución heterogénea, donde, las zonas críticas que implicarían una mayor vulnerabilidad (alta densidad de fracturas abiertas) se localizan principalmente en el sector sur del área de estudio.

DRASTIC original y DRASTIC Modificado clasifican el área de estudio en 3 de las 5 categorías de vulnerabilidad propuestas para cada método, predominando la categoría de

vulnerabilidad moderada (85.16% en DRASTIC original, 56.98% en DRASTIC Modificado), seguida por la vulnerabilidad alta (14.73% en DRASTIC original, 43.01% en DRASTIC Modificado) y finalmente la vulnerabilidad baja (0.11% en DRASTIC original, 0.002% en DRASTIC Modificado).

DRASTIC Modificado presenta una mayor área en la clase de vulnerabilidad alta (43.01%) con respecto al DRASTIC original (14.73%), siendo el uso de suelo (Lu) el parámetro que más influye en este resultado, seguido de las características del fracturamiento (F).

Objetivo específico 3:

La determinación de los Niveles de Fondo Químico Natural (NBL) de los iones indicadores de contaminación arrojó valores (percentil 90) para el Acuífero Somero de NO_3^- : 2.12 mg/L, PO_4^{3-} : 0.05 mg/L, SO_4^{2-} : 26.77 mg/L y Cl^- : 7.45 mg/L. Los NBL para el Acuífero Superior fueron de NO_3^- : 3.17 mg/L, PO_4^{3-} : 0.17 mg/L, SO_4^{2-} : 5.06 mg/L y Cl^- : 5.34 mg/L. Estos NBL proporcionan la línea base de aguas subterráneas naturales del Sistema Acuífero del Miembro Superior de la Formación los Santos que no presentan trazas de impacto humano.

Las áreas donde actualmente se superan los Niveles de Fondo Químico Natural (NBL) para los iones indicadores de contaminación (NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} y Cl^-) se distribuyen de manera amplia por toda la zona, confirmando que las áreas altamente antropizadas conllevan a prácticas (agrícolas, agropecuarias, industriales y domésticas) que representan un riesgo para la calidad de las aguas subterráneas.

Según la metodología aplicada en este trabajo, se encontró que DRASTIC Modificado tiene una mayor coincidencia de su categoría de vulnerabilidad alta con las áreas donde se superan los Niveles de Fondo Químico Natural (NBL) (40.50% para NO_3^- , 68.12% para PO_4^{3-} , 47.94% para

SO₄²⁻ y 43.010% para Cl⁻ en época lluviosa; 42.82% para NO₃⁻, 44.64% para PO₄³⁻, 42.94% para SO₄²⁻ y 43.010% para Cl⁻ en época seca) con respecto al DRASTIC original, siendo así el método que mejor representa la vulnerabilidad a la contaminación del Sistema Acuífero del Miembro Superior de la Formación Los Santos.

DRASTIC Modificado indica que el Sistema Acuífero del Miembro Superior de la Formación los Santos configura un ambiente hidrogeológico altamente vulnerable a la contaminación que debe restringir los usos de sus suelos con respecto a las actividades identificadas como generadoras de contaminantes si se desea conservar la calidad de la actual fuente de abastecimiento. Dicha calidad ya ha sido afectada como muestran los resultados de hidroquímica que revelan aguas contaminadas que superan los límites de potabilidad establecidos por las normas colombianas (Según Decreto 1575 de la resolución 2115 de 2007) con referencia a los iones NO₃⁻ (en A1, A5, A7, A15, A23, A29 y P2) y PO₄³⁻ (en A28, P2 y P5).

De forma general:

Los resultados de este estudio, obtenidos a una escala mediana (1:25.000), basados en un modelo conceptual de acuíferos y en la estimación de su vulnerabilidad validada mediante Niveles de Fondo Químico Naturales (NBL), deben ser tenidos en cuenta en un Plan de Manejo Ambiental del Sistema Acuífero (PMAA) del Miembro Superior de la Formación Los Santos que le permita a la comunidad y a las autoridades competentes tomar medidas y acciones necesarias para gestionar y conservar adecuadamente el recurso hídrico subterráneo que en la zona de estudio es altamente vulnerable y escaso en épocas secas.

9. Recomendaciones

Se recomienda llevar a cabo estudios de caracterización y extensión de los perfiles de meteorización de las rocas del Miembro Superior de la Formación Los Santos en el área de investigación. Esto permitirá definir la extensión de los Acuíferos Someros y proporcionar información para mejorar el modelo hidrogeológico conceptual preliminar aquí propuesto.

Se sugiere en futuros estudios aplicar pruebas de campo que densifiquen la información hidráulica (p. Ej. Slug test en aljibes) así como la implementación de mecanismos de medición de niveles en los pozos para entender de mejor manera el comportamiento y posible conexión de las unidades acuíferas localizadas en el Miembro Superior de la Formación los Santos.

Se sugiere que en futuros estudios se profundice en la importancia de las características del fracturamiento (densidad y zonas con fracturas abiertas o cerradas) en la vulnerabilidad a la contaminación del Sistema Acuífero del Miembro Superior de la Formación Los Santos ya que, a pesar de que estas características contribuyeron a la vulnerabilidad obtenida por el método DRASTIC Modificado, se esperaba un mayor impacto del parámetro.

Se recomienda estudiar a detalle las concentraciones obtenidas para los Niveles de Fondo Químico Natural (NBL) del ion SO_4^{2-} en el Acuífero Somero (26.77 mg/L) las cuales llevan a considerar un posible origen geogénico relacionado con capas de yeso reportadas únicamente en el registro litológico de perforación del pozo 4 (P4). En el caso de no encontrarse evidencias suficientes que sustenten la existencia de dichas capas de yeso, se hace necesario acotar las concentraciones permitidas en las muestras analizadas para el establecimiento de los NBL del ion SO_4^{2-} como se hizo con el ion Cl^- .

Se sugiere establecer y poner en marcha un sistema de monitoreo para el Sistema Acuífero del Miembro Superior de la Formación Los Santos, dada su alta vulnerabilidad a la contaminación y la importancia de las aguas subterráneas como fuente de abastecimiento. Este sistema no solo permitiría el seguimiento de parámetros de calidad del agua subterránea, sino también la densificación de información hidráulica y fisicoquímica para mejorar la comprensión del sistema acuífero.

Se recomienda a usuarios y autoridades reguladoras del agua subterránea que los pozos concesionados sean adecuadamente diseñados y construidos para permitir la toma de datos del agua subterránea (mecanismos que faciliten el ingreso de instrumentos) y realizar pruebas de bombeo de mínimo 24 horas que permitan la estimación de los parámetros hidráulicos.

Se recomienda que áreas comparables a la zona de estudio involucren en sus estimaciones de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos el análisis de la capa de uso de suelo como un parámetro efectivo a la hora de evaluar el impacto negativo de las actividades humanas en las aguas subterráneas y las características del fracturamiento como parámetro para definir zonas de flujo rápido de movimiento de contaminantes hacia los acuíferos, que en muchos casos, configuran el único recurso de agua para las poblaciones.

Referencias Bibliográficas

- Abdullah, T. O., Ali, S. S., Al-Ansari, N. A., & Knutsson, S. (2015). Groundwater Vulnerability Mapping Using Lineament Density on Standard DRASTIC Model: Case Study in Halabja Saidaadiq Basin, Kurdistan Region, Iraq. *Engineering*, 07(10), 644–667. <https://doi.org/10.4236/eng.2015.710057>
- Afrifa, G. Y., Ansah-Narh, T., Doe, C., Loh, Y. S. A., Sakyi, P. A., Chegbeleh, L. P., & Yidana, S. M. (2022). A gamma mixture model-based approach for the estimation of natural background levels of NO₃-N in groundwater. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(4), 4975–4983. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01415-5>
- Agudelo, L. J., Zuleta, D. del S., Lasso, J., Agudelo, D. M., Sepúlveda, L. M., & Paredes, D. (2020). Evaluation of aquifer contamination risk in urban expansion areas as a tool for the integrated management of groundwater resources. Case: Coffee Growing Region, Colombia. *Groundwater for Sustainable Development*, 10, 100298. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100298>
- 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), 927–937. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0796-y>
- Aldana, S. C. (2008). *Estratigrafía de la Formación Los Santos en las secciones de La Navarra y El Calicho en la Mesa de los Santos* (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Aller, L. (1985). *DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings.*

https://books.google.com.co/books/about/DRASTIC.html?id=ASjOyAEACAAJ&redir_esc=y

Alvarado, J. (2000). Tema 3: Monitoreo de aguas subterráneas. En: Servicio Nacional de Geología y Minería: SERGEOMIN. (Ed.), *Sobreexplotación, vulnerabilidad y protección de las aguas subterráneas en Cochabamba*.

<http://www.aguabolivia.org/PublicarX/GESTION/TEMA3.htm>.

Aneesh, T., Archama, M., Krishna, R., Arun, T., & Reji, S. (2022). Groundwater vulnerability assessment of an urban coastal phreatic aquifer in India using GIS-based DRASTIC model. *Groundwater for Sustainable Development*, 19, 100810. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100810>

APAT-ISS. (2006). *Protocollo Operativo per la determinazione dei valori di fondo di metalli/metalloidi nei suoli dei siti d'interesse nazionale*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/<https://www.isprambiente.gov.it/files/temi/tec-valori-di-fondo.pdf>

Appelo, C. A. J., & Postma, D. (Eds.). (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution*. <https://doi.org/10.1201/9781439833544>

Aragão, F., Velásquez, L., Galvão, P., de Castro Tayer, T., Nogueira, T., & Ruchkys de Azevedo., U. (2020). Natural background levels and validation of the assessment of intrinsic vulnerability to the contamination in the Carste Lagoa Santa Protection Unit, Minas Gerais, Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 79, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8771-5>

Arezoomand Omid Langrudi, M., Khashei Siuki, A., Javadi, S., & Hashemi, S. R. (2016). Evaluation of vulnerability of aquifers by improved fuzzy drastic method: Case study:

- Aastane Kochesfahan plain in Iran. *Ain Shams Engineering Journal*, 7(1), 11–20.
<https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.11.013>
- Asfaw, D., & Mengistu, D. (2020). Modeling megech watershed aquifer vulnerability to pollution using modified DRASTIC model for sustainable groundwater management, Northwestern Ethiopia. *Groundwater for Sustainable Development*, 11, 100375.
<https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100375>
- Auge, M. (2004). Vulnerabilidad de acuíferos. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, 4, 85-103. <https://doi.org/10.5380/hg.v4i0.2652>
- Awawdeh, M., Al-Kharabsheh, N., Obeidat, M., & Awawdeh, M. (2020). Groundwater vulnerability assessment using modified SINTACS model in Wadi Shueib, Jordan. *Annals of GIS*, 26(4), 377-394. <https://doi.org/10.1080/19475683.2020.1773535>
- Awawdeh, M. M., & Jaradat, R. A. (2010). Evaluation of aquifers vulnerability to contamination in the Yarmouk River basin, Jordan, based on DRASTIC method. *Arabian Journal of Geosciences*, 3(3), 273–282. <https://doi.org/10.1007/s12517-009-0074-9>
- Baalousha, H. M., Tawabini, B., & Seers, T. D. (2021). Fuzzy or non-fuzzy? A comparison between fuzzy logic-based vulnerability mapping and DRASTIC approach using a numerical model. a case study from qatar. *Water*, 13(9), 1288.
<https://doi.org/10.3390/w13091288>
- Baghapour, M. A., Nobandegani, A. F., Talebbeydokhti, N., Bagherzadeh, S., Nadiri, A. A., Gharekhani, M., & Chitsazan, N. (2016). Optimization of DRASTIC method by artificial neural network, nitrate vulnerability index, and composite DRASTIC models to assess groundwater vulnerability for unconfined aquifer of Shiraz Plain, Iran. *Journal of*

- Environmental Health Science and Engineering*, 14(1), 1–16.
<https://doi.org/10.1186/s40201-016-0254-y>
- Balaji, L., Saravanan, R., Saravanan, K., & Sreemantharupini, N. (2021). Groundwater vulnerability mapping using the modified DRASTIC model: the metaheuristic algorithm approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(1), 1-19.
<https://doi.org/10.1007/s10661-020-08787-0>
- Barrera, B. (2006). *Estimación de la recarga en la cuenca superior del río Lebrija mediante el balance de masa del ion cloruro* (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- 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), 356–373.
<https://doi.org/10.1080/15275922.2015.1091407>
- Batlloori, E., & Canto. S. (2022). Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero kárstico en Yucatán, considerando las anomalías gravimétricas de Bouger. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 74(1), 1-23. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2022v74n1a130921>
- Becerra, N. y Parra, C. (2016). *Balance Hídrico Para Estimar Recarga Potencial en la Mesa de Los Santos y Dirección de Flujo de Aguas Subterráneas* (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Bera, A., Mukhopadhyay, B. P., & Das, S. (2022). Groundwater vulnerability and contamination risk mapping of semi-arid Totko river basin, India using GIS-based DRASTIC model and AHP techniques. *Chemosphere*, 307(P2), 135831.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135831>

- Bhuvaneshwaran, C., & Ganesh, A. (2019). Spatial assessment of groundwater vulnerability using DRASTIC model with GIS in Uppar odai sub-watershed, Nandiyar, Cauvery Basin, Tamil Nadu. *Groundwater for Sustainable Development*, 9, 100270. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100270>
- Bi, P., Huang, G., Liu, C., & Li, L. (2022). Geochemical factors controlling natural background levels of phosphate in various groundwater units in a large-scale urbanized area. *Journal of Hydrology*, 608, 127594. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127594>
- Bondu, R., Humez, P., Mayer, B., Chaste, E., Naumenko-Dèzes, M. O., Cloutier, V., Rosa, E., & Kloppmann, W. (2022). Estimating natural background concentrations for dissolved constituents in groundwater: A methodological review and case studies for geogenic fluoride. *Journal of Geochemical Exploration*, 233, 106906. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106906>
- Borrelli, L., Perri, F., Critelli, S., & Gullà, G. (2013). Characterization of granitoid and gneissic weathering profiles of the Mucone River basin (Calabria, southern Italy). *Catena*, 113, 325-340. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.08.014>
- Bouselsal, B., & Ouarekh, M. (2021). Mapping of the Vulnerability to Pollution of El Oued Shallow Aquifer in the Algerian Sahara. In M. Ksibi, et al., (Eds.), *Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions (2nd Edition)* (pp. 963–970). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51210-1_150
- BRIDGE (2006). *Background criteria for the Identification of Groundwater thresholds. Research for Policy Support*. <https://cordis.europa.eu/project/id/6538/reporting>
- Brown, E. T. (1981). *Rock characterization testing & monitoring: ISRM suggested methods. Oxford: pergamon for the commission in testing methods, International society for Rock*

- Mechanic*. <https://searchworks.stanford.edu/view/1071701>
- Busico, G., Cuoco, E., Sirna, M., Mastrocicco, M., & Tedesco, D. (2017). Aquifer vulnerability and potential risk assessment: application to an intensely cultivated and densely populated area in Southern Italy. *Arabian Journal of Geosciences*, 10, 222. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-2996-y>
- Byeranvand, L., & Afzali, A. (2022). The assessment of groundwater vulnerability: A case study in the Doroud-Boroujerd aquifer, Iran. *Environmental Health Engineering and Management*, 9(4), 409–418. <https://doi.org/10.34172/EHEM.2022.44>
- Canora, F., & Sdao, F. (2020). Hydrogeological characterization and groundwater vulnerability to pollution assessment of the high basento river valley carbonate hydrostructure (Basilicata, Southern Italy). *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 20(1), 25–44. <https://doi.org/10.4408/IJEGE.2020-01.O-03>
- Chakraborty, B., Roy, S., Bera, A., Adhikary, P. P., Bera, B., Sengupta, D., Bhunia, G. S., & Shit, P. K. (2022). Groundwater vulnerability assessment using GIS-based DRASTIC model in the upper catchment of Dwarakeshwar river basin, West Bengal, India. *Environmental Earth Sciences*, 81(1). <https://doi.org/10.1007/s12665-021-10002-3>
- Chamanehpour, E., hossein Sayadi, M., & Yousefi, E. (2020). The potential evaluation of groundwater pollution based on the intrinsic and the specific vulnerability index. *Groundwater for sustainable development*, 10, 100313. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100313>
- Ckkraborty, S., Paul, P. K., & Sikdar, P. K. (2007). Assessing aquifer vulnerability to arsenic pollution using DRASTIC and GIS of North Bengal Plain: A case study of English Bazar Block, Malda District, West Bengal, India. *Journal of Spatial Hydrology*, 7(1), 101–121.

- CNA (2014). Censo Nacional Agropecuario. DANE. <https://www.datos.gov.co/widgets/6pmq-2i7c>
- CNPV (2018). Censo Nacional de Población y Vivienda. DANE. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018>
- Custodio, E. (1995). Consideraciones sobre el concepto de vulnerabilidad de los acuíferos. *En II Seminario Hispano–argentino sobre Temas Actuales de Hidrología Subterránea*.
- Cruz, J. V., & Andrade, C. (2015). Natural background groundwater composition in the Azores archipelago (Portugal): A hydrogeochemical study and threshold value determination. *Science of the Total Environment*, 520, 127–135. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.057>
- De Caro, M., Crosta, G. B., & Frattini, P. (2017). Hydrogeochemical characterization and Natural Background Levels in urbanized areas: Milan Metropolitan area (Northern Italy). *Journal of Hydrology*, 547, 455–473. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.025>
- de Souza, M. E. R., Vargas, T. De, & Belladonna, R. (2022). Assessment of the vulnerability to contamination of fractured aquifers based on DRASTIC method: the influence of the lineament density. *Aguas Subterráneas*, 35(3), 1–10. <https://doi.org/10.14295/ras.v35i3.30086>
- Dewandel, B., Lachassagne, P., Wyns, R., Maréchal, J. C., & Krishnamurthy, N. S. (2006). A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *Journal of hydrology*, 330(1-2), 260-284. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.026>
- Díaz, E., Contreras, N., Pinto, J., Velandia, F., Morales, C., & Hincapie, G. (2009). Evaluación

- hidrogeológica preliminar de las unidades geológicas de la Mesa de Los Santos, Santander. *Boletín de Geología*, 31 (1), 61–70.
- Domagalski, J., & Johnson, H. (2012). *Phosphorus and groundwater: establishing links between agricultural use and transport to stream*. <https://pubs.usgs.gov/fs/2012/3004/>
- Ducci, D., de Melo, M. T. C., Preziosi, E., Sellerino, M., Parrone, D., & Ribeiro, L. (2016). Combining natural background levels (NBLs) assessment with indicator kriging analysis to improve groundwater quality data interpretation and management. *Science of the Total Environment*, 569–570, 569–584. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.184>
- Duhalde, D., Arumí, J., Oyarzún, R., & Rivera, D. (2018). Fuzzy-based assessment of groundwater intrinsic vulnerability of a volcanic aquifer in the Chilean Andean Valley. *Environmental monitoring and assessment*, 190, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6758-4>
- Edmunds, W., & Shand, P. (2008). *Natural Groundwater Quality*. DOI:10.1002/9781444300345
- Edmunds, W., Shand, P., Hart, P., & Ward, S. (2003). The natural (baseline) quality of groundwater: a UK pilot study. *Science of the Total Environment*, 310(1-3), 25-35. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00620-4](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00620-4)
- Elmeknassi, M., El Mandour, A., Elgettafi, M., Himi, M., Tijani, R., El Khantouri, F. A., & Casas, A. (2021). A GIS-based approach for geospatial modeling of groundwater vulnerability and pollution risk mapping in Bou-Areg and Gareb aquifers, northeastern Morocco. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(37), 51612–51631. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14336-0>
- Entezari, M., Yamani, M., Jafari M. (2016). Evaluation of intrinsic vulnerability, hazard and risk mapping for karst aquifers, Khorein aquifer, Kermanshah province: a case study. *Environmental Earth Sciences*, 75(5), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s12665-016->

5258-5

- EPA (1991). *A review of methods for assessing the sensitivity of aquifers to pesticide contamination*. <https://nepis.epa.gov>
- Espinoza, C., & Ramírez, J. (2002). Análisis comparativo de técnicas de evaluación de vulnerabilidad de acuíferos. Aplicación a la zona norte de la ciudad de Santiago de Chile. II Seminario-Taller de protección de acuíferos frente a la contaminación, Habana, Cuba.
- Etuk, M., Viaroli, S., Ogbonnaya, I., & Re, V. (2022). Vulnerability mapping as a tool to foster groundwater protection in areas subject to rapid population expansion: The case study of Abuja Federal Capital Territory (Nigeria). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 42, 101158. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101158>
- Fiori, A., Pomarico, I., Zarlenga, A., Catani, V., & Leone, G. (2023). Extending the Overlay and Index: A Simple Method for Assessing Aquifer Vulnerability in a Combined Vadose Zone - Groundwater Flow System. *Water*, 15(2). <https://doi.org/10.3390/w15020364>
- Foster, S. (1987). Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy. In W. Van Duijvenbooden, & H.G. Van Waegeningh (Eds.), *Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants, Committee on Hydrological Research* (pp. 69-86). The Hague.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., DELia, M., & Paris, M. (2002). *Protección de la calidad del agua subterránea. Banco Mundial.* [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://documents1.worldbank.org/curated/en/229001468205159997/pdf/25071PUB01Spanish10BOX0334116B01PUBLIC1.pdf](https://documents1.worldbank.org/curated/en/229001468205159997/pdf/25071PUB01Spanish10BOX0334116B01PUBLIC1.pdf)
- Fritzsons E. (2003). *Avaliação temporal da qualidade de água como diagnóstico do uso e ocupação das terras na bacia do Alto Capivari, região cárstica curitibana, PR* (Tese de

- mestrado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Fritzons, E., Hindi, E. C., Mantovani, L. E., & Rizzi, N. E. (2003). As Alterações Da Qualidade Da Água Do Rio Capivari. Capivari Stream Water Quality Variability With Discharge: A Diagnostic Stream Water Quality Variability With Discharge. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 8(4), 239- 248.
- Fritzons, E., Mantovani, L. E., Chaves Neto, A., & Hindi, E. C. (2009). A influência das atividades mineradoras na alteração do pH e da alcalinidade em águas fluviais: o exemplo do rio Capivari, região do carste paranaense. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 14(3), 381–390. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522009000300012>
- Gao, Y., Qian, H., Huo, C., Chen, J., & Wang, H. (2020). Assessing natural background levels in shallow groundwater in a large semiarid drainage Basin. *Journal of Hydrology*, 584, 124638. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124638>
- García, S. (2022). *Análisis estructural de la Mesa de Los Santos y redes neuronales para la estimación local de las propiedades físicas de la roca* (Tesis de maestría). Trabajo de Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Gautam, S., Singh, S., Rawat, K. (2021). Intrinsic vulnerability evaluation of groundwater nitrate pollution along a course of the Subarnarekha River in Jharkhand, India. *Water Conservation Science and Engineering*, 6(2), 55-66. <https://doi.org/10.1007/s41101-021-00102-3>
- Gellasch, C.A., Bradbury, K.R., Hart, D.J. & Bahr, J.M. (2013). Characterization of fracture connectivity in a siliciclastic bedrock aquifer near a public supply well (Wisconsin, USA). *Hydrogeology Journal*, 21, 383–399. <https://doi.org/10.1007/s10040-012-0914-7>
- Gharakezloo, Y. N., Nikoo, M. R., Karimi-Jashni, A., & Mooselu, M. G. (2022). A hybrid

- statistical decision-making optimization approach for groundwater vulnerability considering uncertainty. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(6), 8597–8612. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16242-x>
- Ghosh, R., Sutradhar, S., Mondal, P., & Das, N. (2021). Application of DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability: a study on Birbhum district, West Bengal, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(2), 1225–1239. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-01047-7>
- Gogu, R., & Dassargues, A. (2000). Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental Geology*, 39(6), 549–559. <https://doi.org/10.1007/s002540050466>
- Goldscheider, N., Hötzl, H., Fries, W., & Jordan, P. (2001). Validation of a vulnerability map (EPIK) with tracer tests. En: J. Mudry & F. Zwaler (Eds.), *Proceeding of the 7th Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media*, Besançon - Francia.
- Gomez Sánchez, C. F., Wandurraga Jiménez, L., Molina Narváez, M., Sarmiento Romero, M. (2014). *Análisis de la Situación Hidrogeológica de la Mesa de Los Santos, Departamento de Santander* (Tesis de especialización). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Goodarzi, M. R., Niknam, A. R. R., Jamali, V., & Pourghasemi, H. R. (2022). Aquifer vulnerability identification using DRASTIC-LU model modification by fuzzy analytic hierarchy process. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(4), 5365–5380. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01408-4>
- Guo, X., Yang, Z., Li, C., Xiong, H., & Ma, C. (2023). Combining the classic vulnerability index and affinity propagation clustering algorithm to assess the intrinsic aquifer vulnerability of

- coastal aquifers on an integrated scale. *Environmental Research*, 217, 114877.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114877>
- GWP (2011). ¿Qué es la GIRH? <https://www.gwp.org/es/GWP-Sud-America/ACERCA/por-que/PRINCIPALES-DESAFIOS/Que-es-la-GIRH/>
- Hamamin, D. F., & Nadiri, A. A. (2018). Supervised committee fuzzy logic model to assess groundwater intrinsic vulnerability in multiple aquifer systems. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(8). <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3517-3>
- Hasan, M., Islam, M. A., Aziz Hasan, M., Alam, M. J., & Peas, M. H. (2019). Groundwater vulnerability assessment in Savar upazila of Dhaka district, Bangladesh — A GIS-based DRASTIC modeling. *Groundwater for Sustainable Development*, 9, 100220.
<https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100220>
- He, Baonan, He, J., Wang, L., Zhang, X., & Bi, E. (2019). Effect of hydrogeological conditions and surface loads on shallow groundwater nitrate pollution in the Shaying River Basin: Based on least squares surface fitting model. *Water Research*, 163, 114880.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114880>
- He, B., He, J. T., Zeng, Y., Sun, J., Peng, C., & Bi, E. (2022). Coupling of multi-hydrochemical and statistical methods for identifying apparent background levels of major components and anthropogenic anomalous activities in shallow groundwater of the Liujiang Basin, China. *Science of the Total Environment*, 838, 155905.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155905>
- Healy, R., & Cook, P. (2002). Using groundwater levels to estimated recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, 91-109. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0178-0>
- Hernández, M. E., & Custodio, E. (2004). Natural baseline quality of Madrid Tertiary Detrital

- Aquifer groundwater (Spain): a basis for aquifer management. *Environmental Geology*, 46 (2), 173–188. <https://doi.org/10.1007/s00254-004-1024-1>
- Hincapié, G., y Veloza, J. (2009). Informe hidrogeológico de la Mesa de Los Santos. Bogotá. Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS).
- Hinsby, K., Condesso de Melo, M. T., & Dahl, M. (2008). European case studies supporting the derivation of natural background levels and groundwater threshold values for the protection of dependent ecosystems and human health. *Science of the Total Environment*, 401(1–3), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.03.018>
- Hu, X., Ma, C., Qi, H., & Guo, X. (2018). Groundwater vulnerability assessment using the GALDIT model and the improved DRASTIC model: a case in Weibei Plain, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(32), 32524–32539. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3196-3>
- Huang, G., Song, J., Han, D., Liu, R., Liu, C., & Hou, Q. (2023). Assessing natural background levels of geogenic contaminants in groundwater of an urbanized delta through removal of groundwaters impacted by anthropogenic inputs: New insights into driving factors. *Science of the Total Environment*, 857, 159527. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159527>
- IDEAM (2015). *Principios básicos para el conocimiento y monitoreo de las aguas subterráneas en Colombia*. http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=38002&shelfbrowse_itemnumber=39615
- Ifediegwu, S. I., & Chibuike, I. E. (2021). GIS-based evaluation of shallow aquifer vulnerability to pollution using DRASTIC model: a case study on Abakaliki, southeastern, Nigeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(23), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08811-8>

- IngeoExploraciones-CAS (2016). *Elaboración y Formulación Del Plan de Manejo de Aguas Subterráneas en el Sector de la Mesa, Municipio de Los Santos. Fase II.*
- Islam, M. M., Marandi, A., Zahid, A., Rabeya, I., & Fatema, S. (2023). BRIDGE methodology–based quality standards to assess aquifer chemical status in the southwest Bengal Basin, Bangladesh. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(2). <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10854-7>
- ISPRA (2009). *Protocollo per la Definizione dei Valori di Fondo per le Sostanze Inorganiche nelle Acque Sotterranee.* chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/<https://www.isprambiente.gov.it/files/temi/fondo-metalli-acque-sotterranee.pdf>
- Jamali, M. Y., Namous, M., Tallou, A., Khadija, A., & Amir, S. (2020). Estimation of Groundwater Vulnerability to Pollution Based on DRASTIC and SI Methods: A Case Study of the Irrigated Area of Tadla Plain, Oum Errabia Basin, Morocco. In *Proceedings of the 4th Edition of International Conference on Geo-IT and Water Resources 2020*, Geo-IT and Water Resources 2020 (pp. 1-5). <https://doi.org/10.1145/3399205.3399223>
- János, M., Daniela, S., Veronika, I., Lászlió, M., Klaudia, K., Mária, S., Andrea, B., & Gábor, C. (2017). Changes of the karst landscape and epikarst system in the area of the Tapolca karst terrains, North-West Balaton Highlands, Hungary. *Forum Geografic*, 16(1), 12–25. <https://doi.org/10.5775/fg.2017.074.i>
- Jaunat, J., Garel, E., Huneau, F., Erostate, M., Santoni, S., Robert, S., Fox, D., & Pasqualini, V. (2019). Combinations of geoenvironmental data underline coastal aquifer anthropogenic nitrate legacy through groundwater vulnerability mapping methods. *Science of the Total Environment*, 658, 1390–1403. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.249>

- Jenifer, M. A., & Jha, M. K. (2018). Comparative evaluation of GIS-based models for mapping aquifer vulnerability in hard-rock terrains. *Environmental Earth Sciences*, 77. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7821-8>
- Jesudhas, C. J., Chinnasamy, A., Muniraj, K., & Sundaram, A. (2021). Assessment of vulnerability in the aquifers of rapidly growing sub-urban: a case study with special reference to land use. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(1). <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06439-8>
- Jiang, G., Guo, F., & Polk, J. S. (2014). Delineating vulnerability of karst aquifers using hydrochemical tracers in Southwestern China. *Environmental Earth Sciences*, 74, 1015–1027. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3862-9>
- Jiménez-Madrid, A., Gogu, R., Martínez-Navarrete, C., & Carrasco, F. (2019). Groundwater for human consumption in karst environment: Vulnerability, protection, and management. In D. Barceló, & A. Kostianoy (Eds.), *Handbook of Environmental Chemistry* (pp. 45-63). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77368-1_2
- mads, N. A., Hansen, J., Springer, A. E., Valle, C., & Tobin, B. W. (2019). Modeling intrinsic vulnerability of complex karst aquifers: Modifying the COP method to account for sinkhole density and fault location. *Hydrogeology Journal*, 27(8), 2857-2868. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-02056-2>
- Kazakis, N., Chalikakis, K., Mazzilli, N., Ollivier, C., Manakos, A., & Voudouris, K. (2018). Management and research strategies of karst aquifers in Greece: Literature overview and exemplification based on hydrodynamic modelling and vulnerability assessment of a strategic karst aquifer. *Science of the Total Environment*, 643, 592–609. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.184>
- Khadra, W. M., Elias, A. R., & Majdalani, M. A. (2022). A systematic approach to derive natural

- background levels in groundwater: Application to an aquifer in North Lebanon perturbed by various pollution sources. *Science of the Total Environment*, 847, 157586. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157586>
- Khakhar, M., Ruparelia, J. P., & Vyas, A. (2021). Sintacs method for assessment of groundwater vulnerability: A case of Ahmedabad, India. En S. Kumar, S. Kanga, G. Meraj, & M. Farooq (Eds.), *Geographic Information Science for Land Resource Management* (pp. 373 - 406). Wiley
- Khan, M. U., Musahib, M., Vishwakarma, R., Rai, N., & Jahan, A. (2023). Hydrochemical characterization, mechanism of mobilization, and natural background level evaluation of arsenic in the aquifers of upper Gangetic plain, India. *Geochemistry*, 125952. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2023.125952>
- Kim, K. H., Yun, S. T., Kim, H. K., & Kim, J. W. (2015). Determination of natural backgrounds and thresholds of nitrate in South Korean groundwater using model-based statistical approaches. *Journal of Geochemical Exploration*, 148, 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.10.001>
- Klug, J. (2009). Modeling the risk of groundwater contamination using DRASTIC and geographic information systems in Houston County, Minnesota. *Papers in Resource Analysis*, 11, 12.
- Kong, M., Zhong, H., Wu, Y., Liu, G., Xu, Y., & Wang, G. (2019). Developing and validating intrinsic groundwater vulnerability maps in regions with limited data: a case study from Datong City in China using DRASTIC and Nemerow pollution indices. *Environmental Earth Sciences*, 78. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8255-7>
- Kumar, A., & Pramod Krishna, A. (2020). Groundwater vulnerability and contamination risk assessment using GIS-based modified DRASTIC-LU model in hard rock aquifer system in

- India. *Geocarto International*, 35(11), 1149–1178.
<https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1557259>
- Kumar, C. P. (2012). Climate Change and Its Impact on Groundwater Resources Climate Change and Its Impact on Groundwater Resources. *International Journal of Engineering and Science*, 1(5), 43–60.
- Lahjouj, A., Hmaid, A. El, Essahlaoui, A., Alam, M. J. B., Siddiquee, M. S. A., & Bouhafa, K. (2022). Groundwater Vulnerability Assessment Through a Modified DRASTI-LU Framework: Case Study of Saiss Basin in Morocco. *Earth Systems and Environment*, 6(4), 885–902. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00269-8>
- Lasagna, M., De Luca, D. A., & Franchino, E. (2018). Intrinsic groundwater vulnerability assessment: issues, comparison of different methodologies and correlation with nitrate concentrations in NW Italy. *Environmental Earth Sciences*, 77(7).
<https://doi.org/10.1007/s12665-018-7452-0>
- Lisboa, É. G., Mendes, R. L. R., Figueiredo, M. M. P., & Bello, L. A. L. (2020). Fuzzy-probabilistic model for a risk assessment of groundwater contamination: Application to an urban zone in the City of Belem, Para, Brazil. *Water*, 12(5).
<https://doi.org/10.3390/w12051437>
- Liu, M., Xiao, C., & Liang, X. (2022). Assessment of groundwater vulnerability based on the modified DRASTIC model: a case study in Baicheng City, China. *Environmental Earth Sciences*, 81, 0–41. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10350-8>
- Lobo Ferreira, J. (1997). *GIS and mathematical modelling for the assessment of vulnerability and geographical zoning for groundwater management and protection*.
http://www.dha.lnec.pt/nas/textos/novidades/nato97_vulner_internet.html

- Lucon, T. N., Costa, A. T., Galvão, P., & Leite, M. G. P. (2018). Natural background levels and seasonal influence on groundwater chemistry of the Upper São Francisco karst region, MG, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, *48*, 867-879. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201820180071>
- Machiwal, D., Jha, M. K., Singh, V. P., & Mohan, C. (2018). Assessment and mapping of groundwater vulnerability to pollution: Current status and challenges. *Earth-Science Reviews*, *185*, 901–927. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.009>
- MADS. (2014). *Guía metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuíferos*. https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Manejo_de_acuiferos/GUÍA_FORMULACIÓN_PLANES_ACUÍFEROS.pdf
- MAVDT (2010). *Propuesta Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca de los Acuíferos a la Contaminación*. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/44/8/085201>
- Maleki, S., Nourani, V., Najafi, H., Baghanam, A. H., & Ke, C. Q. (2023). Z-numbers based novel method for assessing groundwater specific vulnerability. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *122*, 106104. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106104>
- Manu, E., Afrifa, G. Y., Ansah-Narh, T., Sam, F., & Loh, Y. S. A. (2022). Estimation of natural background and source identification of nitrate-nitrogen in groundwater in parts of the Bono, Ahafo and Bono East regions of Ghana. *Groundwater for Sustainable Development*, *16*(3), 100696. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100696>
- Mao, H., Wang, G., Liao, F., Shi, Z., Huang, X., Li, B., & Yan, X. (2022). Geochemical evolution of groundwater under the influence of human activities : A case study in the southwest of Poyang Lake Basin. *Applied Geochemistry*, *140*, 105299.

<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105299>

- Marandi, A., & Karro, E. (2008). Natural background levels and threshold values of monitored parameters in the Cambrian-Vendian groundwater body, Estonia. *Environmental Geology*, 54, 1217–1225. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0904-6>
- Margat, J. (1968). Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine a la pollution (Groundwater vulnerability to contamination). *Bases de la cartographie*, 68.
- Martínez, M., Delgado, P., & Fabregat, V. (1998). *Aplicación del método DRASTIC para la evaluación del riesgo de afección a las aguas subterráneas por una obra lineal*. <http://aguas.igme.es/igme/publica/pdflib3/martinez.pdf>
- Mendoza, J. A., & Barmen, G. (2006). Assessment of groundwater vulnerability in the Río Artiguas basin, Nicaragua. *Environmental Geology*, 50(4), 569–580. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0233-1>
- Mensah, D. O., Appiah-Adjei, E. K., & Asante, D. (2023). Groundwater pollution vulnerability assessment in the Assin municipalities of Ghana using GIS-based DRASTIC and SINTACS methods. *Modeling Earth Systems and Environment*. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01680-4>
- MinSaludCol (2007). Decreto 1575: Sistema para la protección y control de la calidad del agua para consumo humano potable. Ministerio de la Protección Social de Colombia, Bogotá.
- MAVDT (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*.
- Minitab (2022). *Identifying the distribution of your data*. <https://blog.minitab.com/blog/meredith-griffith/identifying-the-distribution-of-your-data>
- Molinari, A., Guadagnini, L., Marcaccio, M., & Guadagnini, A. (2019). Geostatistical multimodel approach for the assessment of the spatial distribution of natural background concentrations

- in large-scale groundwater bodies. *Water Research*, 149, 522–532.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.09.049>
- Molinari, A., Guadagnini, L., Marcaccio, M., & Guadagnini, A. (2012). Natural background levels and threshold values of chemical species in three large-scale groundwater bodies in Northern Italy. *Science of the Total Environment*, 425, 9–19.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.015>
- Moreno, M.L. y Silva, K. (2021). *Identificación de ambientes geomorfológicos y elaboración de un mapa de favorabilidad para la percolación de la zona de la Mesa de Los Santos, Santander* (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Müller, D., Blum, A., Hart, A., Hookey, J., Kunkel, R., Scheidleder, A., Tomlin, C., & Wendland, F. (2006). *D18: final proposal for a methodology to set up groundwater threshold values in Europe. BRIDGE*. https://cordis.europa.eu/result/rcn/51965_en.html
- Navas, E., García, M., Llamas, R., & Vrba, J. (1998). *La vulnerabilidad de las aguas subterráneas en el plan regional de la comunidad autónoma de Madrid*.
<http://aguas.igme.es/igme/publica/pdflib3/navasgue.pdf>
- Nadiri, A. A., Norouzi, H., Khatibi, R., & Gharekhani, M. (2019). Groundwater DRASTIC vulnerability mapping by unsupervised and supervised techniques using a modelling strategy in two levels. *Journal of Hydrology*, 574, 744–759.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.039>
- Nakić, Z., Posavec, K., & Bačani, A. (2007). A visual basic spreadsheet macro for geochemical background analysis. *Groundwater*, 45(5), 642–647. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2007.00325.x>

- Nanou, E.-A., & Zagana, E. (2018). Groundwater vulnerability to pollution map for karst aquifer protection (Ziria karst system, Southern Greece). *Geosciences*, 8(4).
<https://doi.org/10.3390/geosciences8040125>
- Nekkoub, A., Baali, F., Hadji, & Hamed, Y. (2020). The Epik multi-attribute method for intrinsic vulnerability assessment of karstic aquifer under semi-arid climatic conditions, case of Cheria Plateau, NE Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 13. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05704-0>
- Neukum, C., Hötzl, H., & Himmelsbach, T. (2008). Validation of vulnerability mapping methods by field investigations and numerical modelling. *Hydrogeology Journal*, 16, 641–658.
<https://doi.org/10.1007/s10040-007-0249-y>
- Nieto, P., Custodio, E., & Manzano, M. (2005). Baseline groundwater quality: A European approach. *Environmental Science and Policy*, 8(4), 399–409.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2005.04.004>
- Nkembe, S. E., & Defo, C. (2022). Assessment of piezometric distribution and vulnerability of groundwater to pollution in a tropical environment: the case study of the aquifer of Santchou, Cameroon, Central Africa. *Sustainable Water Resources Management*, 8(2), 1–15.
<https://doi.org/10.1007/s40899-022-00605-4>
- Norouzi, H., Moghaddam, A. A., Celico, F., & Shiri, J. (2021). Assessment of groundwater vulnerability using genetic algorithm and random forest methods (case study: Miandoab plain, NW of Iran). *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 39598–39613.
<https://doi.org/10.1007/s11356-021-12714-2>
- OMS (2001). *Guías para la calidad del agua de consumo humano*. <https://apps.who.int>
- Ossa, J., & Betancurt, T. (2018). Nivel de Fondo Químico Natural para el Sistema de Acuífero del

- Urabá Antioqueño. En R. Garcia (Ed.), *El Agua Subterránea: Recurso sin Fronteras: Química, Calidad y Contaminación del Agua. Volumen I* (pp. 207-215). Editorial de la Universidad Nacional de Salta.
- Ouzerbane, Z., Loulida, S., Boughalem, M., Hmaid, A. El, Essahlaoui, A., & Najine, A. (2022). Application of GIS for assessing the vulnerability of aquifers to pollution in the coastal zone of Essaouira, Morocco. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(1). <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09673-z>
- Panagopoulos, G. P., Antonakos, A. K., & Lambrakis, N. J. (2006). Optimization of the DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and GIS. *Hydrogeology Journal*, 14(6), 894–911. <https://doi.org/10.1007/s10040-005-0008-x>
- Panno, S. V., Kelly, W. R., Martinsek, A. T., & Hackley, K. C. (2006). Estimating background and threshold nitrate concentrations using probability graphs. *Groundwater*, 44(5), 697–709. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2006.00240.x>
- Parrone, D., Frollini, E., Masciale, R., Melita, M., Passarella, G., Preziosi, E., & Ghergo, S. (2022). A double pre-selection method for natural background levels assessment in coastal groundwater bodies. *Environmental Pollution*, 313, 120076. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120076>
- Parrone, D., Ghergo, S., & Preziosi, E. (2019). A multi-method approach for the assessment of natural background levels in groundwater. *Science of the Total Environment*, 659, 884–894. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.350>
- Patel, P., Mehta, D., & Sharma, N. (2022). A review on the application of the DRASTIC method in the assessment of groundwater vulnerability. *Water Supply*, 22(5), 5190–5205.

<https://doi.org/10.2166/ws.2022.126>

Petrović, B. (2020). Intrinsic groundwater vulnerability assessment by multiparameter methods, a case study of Suva Planina Mountain (SE Serbia). *Environmental Earth Sciences*, 79. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-8825-8>

Phok, R., Kosgallana Duwage Wasantha, N., Sumana Bandara, W., Herath Mudiyansele, Thalapitiye Gedara Amarasooriya, P., & Hingure Arachchilage, D. (2021). Using intrinsic vulnerability and anthropogenic impacts to evaluate and compare groundwater risk potential at northwestern and western coastal aquifers of Sri Lanka through coupling DRASTIC and GIS approach. *Applied Water Science*, 11(7), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01452-y>

Popescu, I.-C., Brouyère, S., & Dassargues, A. (2019). The APSÛ method for process-based groundwater vulnerability assessment . *Hydrogeology Journal*, 27(7), 2563–2579. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-02013-z>

Pinto, J., Clavijo, J., Gómez, S., Gutiérrez, D., Mora, J., Rojas, N., Adarme, I., Aldana, S., Contreras, N., Díaz, E., Melo, L., Tarazona, G., Rincón, M., Vargas, C., Morales, C., Velandia, F., Hincapié, G., Forero, H., Duarte, R., Vargas, C., y Bermoude, O. (2007). Memoria explicativa de la investigación geológica e hidrogeológica en la Mesa de Los Santos y sector nordeste de Curití. Bogotá. Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS) y Universidad Industrial de Santander.

Preziosi, E., Giuliano, G., & Vivona, R. (2010). Natural background levels and threshold values derivation for naturally As, V and F rich groundwater bodies: A methodological case study in Central Italy. *Environmental Earth Sciences*, 61(5), 885–897. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0404-y>

- Preziosi, E., Parrone, D., Del Bon, A., & Ghergo, S. (2014). Natural background level assessment in groundwaters: Probability plot versus pre-selection method. *Journal of Geochemical Exploration*, 143, 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.03.015>
- Rahman, M., Haque, M. M., & Tareq, S. M. (2021). Appraisal of groundwater vulnerability in south-central part of Bangladesh using DRASTIC model: An approach towards groundwater protection and health safety. *Environmental Challenges*, 5, 100391. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100391>
- Rama, F., Busico, G., Arumi, J. L., Kazakis, N., Colombani, N., Marfella, L., Hirata, R., Kruse, E. E., Sweeney, P., & Mastrocicco, M. (2022). Assessment of intrinsic aquifer vulnerability at continental scale through a critical application of the drastic framework: The case of South America. *Science of the Total Environment*, 823(1). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153748>
- Ramírez, E. (1974). *Retención de sulfatos y relación fosfato-sulfato en los suelos de Costa Rica* (Tesis de maestría). Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA.
- Ravbar N., & Goldscheider, N. (2007). Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in Slovenia. *Acta carsologica*, 36(3). <https://doi.org/10.3986/ac.v36i3.174>
- Reimann, C., Filzmoser, P., & Garrett, R. G. (2005). Background and threshold: Critical comparison of methods of determination. *Science of the Total Environment*, 346(1–3), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.11.023>
- Rincon, M. A. (2008). *Estratigrafía de la Formación los Santos en las secciones estratigráficas La Punta, Carrizal (Mesa de los Santos) y La Cuevana (Curití), Departamento de Santander* (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga,

Colombia.

- Romero, I., y Urrea, C. (2021). *Inventario de fuentes de contaminación en el acuífero superior de la Mesa de Los Santos (Santander)* (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Rubiantoro, P., & Gari Amrina, B. (2020). Intrinsic vulnerability assessment of shallow groundwater to pollution using the GOD Method by utilizing geoelectric data: A case study of the city of Pasuruan, East Java, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 437(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/437/1/012004>
- Rueda, O. (2006). *Aplicación y análisis comparativo entre metodologías de evaluación de vulnerabilidad de acuíferos y confrontación con parámetros de calidad de agua subterránea en el Bajo Cauca Antioqueño* (Tesis de maestría). Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
- Rufino, F., Busico, G., Cuoco, E., Darrah, T. H., & Tedesco, D. (2019). Evaluating the suitability of urban groundwater resources for drinking water and irrigation purposes: an integrated approach in the Agro-Aversano area of Southern Italy. *Environmental monitoring and assessment*, 191(12), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7978-y>
- Runkel, A.C., Tipping, R.G., Alexander, E.C. Jr, & Alexander, S.C. (2006). Hydrostratigraphic characterization of intergranular and secondary porosity in part of the Cambrian sandstone aquifer system of the cratonic interior of North America: Improving predictability of hydrogeologic properties. *Sedimentary Geology*, 184, 281–304. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.11.006>
- Sahu, I., Prasad, A. D., & Ahmad, I. (2022). Comparison of GIS-Based Intrinsic Groundwater Vulnerability Assessment Methods: DRASTIC and SINTACS. *Nature Environment and*

- Pollution Technology*, 21(5), 2249–2258.
<https://doi.org/10.46488/NEPT.2022.v21i05.019>
- Salman, S. A., Arauzo, M., & Elnazer, A. A. (2019). Groundwater quality and vulnerability assessment in west Luxor Governorate, Egypt. *Groundwater for Sustainable Development*, 8, 271-280. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.11.009>
- Samadi, J. (2022). Modelling hydrogeological parameters to assess groundwater pollution and vulnerability in Kashan aquifer: Novel calibration-validation of multivariate statistical methods and human health risk considerations. *Environmental Research*, 211, 113028. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113028>
- Saranya, T., & Saravanan, S. (2022). Assessment of groundwater vulnerability using analytical hierarchy process and evidential belief function with DRASTIC parameters, Cuddalore, India. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(2), 1837–1856. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-03944-z>
- Saravanan, S., Pitchaikani, S., Thambiraja, M., Sathiyamurthi, S., Sivakumar, V., Velusamy, S., & Shanmugamoorthy, M. (2023). Comparative assessment of groundwater vulnerability using GIS-based DRASTIC and DRASTIC-AHP for Thoothukudi District, Tamil Nadu India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(1). <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10601-y>
- Sarikhani, R., Kamali, Z., Dehnavi, A. G., & Sahamieh, R. Z. (2014). Correlation of lineaments and groundwater quality in Dasht-e-Arjan Fars, SW of Iran. *Environmental Earth Sciences*, 72(7), 2369–2387. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3146-4>
- Satouh, A., Bousalsal, B., Chellat, S., & Benaabidate, L. (2021). Determination of Groundwater Vulnerability Using the DRASTIC Method in Ouargla Shallow Aquifer (Algerian Sahara).

- Journal of Ecological Engineering*, 22(6), 12–19. <https://doi.org/10.12911/22998993/137680>
- Schenone, N., Volpedo, A. V., & Cirelli, A. F. (2007). Trace metal contents in water and sediments in Samborombón Bay wetland, Argentina. *Wetlands Ecology and Management*, 15(4), 303–310. <https://doi.org/10.1007/s11273-006-9030-6>
- Sekar, S., Kamaral, J., Poovalingam, S., Duraisamy, R., Senapathi, V., & Sang, C. (2023). Appraisal of Groundwater Vulnerability Pollution Mapping. *Water*, 15. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w15030520>
- Sellerino, M., Forte, G., & Ducci, D. (2019). Identification of the natural background levels in the Phlaegrean fields groundwater body (Southern Italy). *Journal of Geochemical Exploration*, 200, 181–192. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.02.007>
- Sener, E., Sener, S., & Davraz, A. (2009). Assessment of aquifer vulnerability based on GIS and DRASTIC methods: A case study of the Senirkent-Uluborlu Basin (Isparta, Turkey). *Hydrogeology Journal*, 17(8), 2023–2035. <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0497-0>
- Sener, E., & Davraz, A. (2013). Assessment of groundwater vulnerability based on a modified DRASTIC model, GIS and an analytic hierarchy process (AHP) method: the case of Egirdir Lake basin (Isparta, Turkey). *Hydrogeology Journal*, 21(3), 701–714. <https://doi.org/10.1007/s10040-012-0947-y>
- Serianz, L., Cerar, S., & Šraj, M. (2020). Hydrogeochemical characterization and determination of natural background levels (NBL) in groundwater within the main lithological units in Slovenia. *Environmental Earth Sciences*, 79(15), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09112-1>
- Shakoor, A., Khan, Z. M., Farid, H. U., Sultan, M., Ahmad, I., Ahmad, N., Mahmood, M. H., & Ali, M. U. (2020). Delineation of regional groundwater vulnerability using DRASTIC model

- for agricultural application in Pakistan. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(4).
<https://doi.org/10.1007/s12517-020-5161-y>
- Shand, P., Edmunds, W. M., Lawrence, A. R., Smedley, P. L., & Burke, S. (2007). *The natural (baseline) quality of groundwater in England and Wales*.
<https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/3578/>
- Shekhar, S., Pandey, A. C., & Tirkey, A. S. (2014). A GIS-based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in hard rock granitic aquifer. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(3), 1385–1401. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1285-2>
- Shrestha, S., Kafle, R., & Pandey, V. P. (2017). Evaluation of index-overlay methods for groundwater vulnerability and risk assessment in Kathmandu Valley, Nepal. *Science of the Total Environment*, 575, 779–790. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.141>
- Sinha, M. K., Verma, M. K., Ahmad, I., Baier, K., Jha, R., & Azzam, R. (2016). Assessment of groundwater vulnerability using modified DRASTIC model in Kharun Basin, Chhattisgarh, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(2), 1–22. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2180-1>
- Sinhal, B., & Gupta, R. (2010). *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*.
<https://doi.org/10.1007/978-90-481-8799-7>
- Soyaslan, İ. İ. (2020). Assessment of groundwater vulnerability using modified DRASTIC-Analytical Hierarchy Process model in Bucak Basin, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(21). <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06101-3>
- Stevanović, Z., Marinović, V., & Krstajić, J. (2021). CC-PESTO: a novel GIS-based method for assessing the vulnerability of karst groundwater resources to the effects of climate change. *Hydrogeology Journal*, 29(1), 159–178. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02251-6>

- Taghavi, N., Niven, R. K., Kramer, M., & Paull, D. J. (2023). Comparison of DRASTIC and DRASTICL groundwater vulnerability assessments of the Burdekin Basin, Queensland, Australia. *Science of the Total Environment*, 858, 159945. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159945>
- Taheri, K., Missimer, T., Bayatvarkeshi, M., Mahmoudi, S., Fathi, S., Toranjian, A. & Dehghan, B. (2023). An intrinsic vulnerability approach to assess an overburden alluvial aquifer exposure to sinkholeprone area; results from a Central Iran case study. *Geocarto International*, 38(1), 2168068. <https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2168068>
- Tarazona Lizcano, Y., Vargas-López, M. C., & Velandia, F. (2021). Análisis cuantitativo de sistemas de fracturas y sus implicaciones hidrogeológicas en la zona sur de la Mesa de Los Santos, Santander-Colombia. *Boletín de Geología*, 43(3), 107-123.
- Tayer, T. C., & Velásques, L. N. M. (2017). Assessment of intrinsic vulnerability to the contamination of karst aquifer using the COP method in the Carste Lagoa Santa Environmental Protection Unit, Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 76(13). <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6760-0>
- Torkashvand, M., Neshat, A., Javadi, S., & Yousefi, H. (2021). DRASTIC framework improvement using Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA) and combination of Genetic Algorithm and Entropy. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(34), 46704–46724. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11406-7>
- Tziritis, E., Pisinaras, V., Panagopoulos, A., & Arampatzis, G. (2021). RIVA: a new proposed method for assessing intrinsic groundwater vulnerability. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(6), 7043–7067. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10872-3>
- Umar, R., Ahmed, I., & Alam, F. (2009). Mapping groundwater vulnerable zones using modified

- DRASTIC approach of an alluvial aquifer in parts of central Ganga plain, western Uttar Pradesh. *Journal of the Geological Society of India*, 73(2), 193–201.
<https://doi.org/10.1007/s12594-009-0075-z>
- UNESCO (2021). *The United Nations World Water Development Report 2021: Valuing water*.
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375724>
- UNESCO (2022). *The United Nations World Water Development Report 2022: Groundwater: Making the invisible visible*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380721>
- USDA (2020). *Soil Texture Calculator*. <https://www.nrcs.usda.gov/resources/education-and-teaching-materials/soil-texture-calculator>.
- USGS (2016). *Contaminants found in groundwater*. *United States Geological Survey*.
<https://water.usgs.gov/edu/groundwater-contaminants.html>.
- USGS (2023). *Sustainability of Ground-Water Resources--Circular 1186*.
https://pubs.usgs.gov/circ/circ1186/html/gen_facts.html.
- Vázquez-Suñé, E., Sánchez-Vila, X., & Carrera, J. (2005). Introductory review of specific factors influencing urban groundwater, an emerging branch of hydrogeology, with reference to Barcelona, Spain. *Hydrogeology Journal*, 13(3), 522–533. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0360-2>
- Vencelides, Z., Hrkal, Z., & Prchalová, H. (2010). Determination of the natural background content of metals in ground waters of the Czech Republic. *Applied Geochemistry*, 25(5), 755–762. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2010.02.008>
- Vrba, J., & Zaporozec, A. (1994). *Guidebook on mapping groundwater vulnerability - IAH International Association of Hydrogeologists*. Editorial Hannover.
- Vrouhakis, I., Tziritis, E., Stamatis, G., & Panagopoulos, A. (2022). Groundwater Vulnerability

- Analysis of Tirnavos Basin, Central Greece: An Application of RIVA Method. *Water*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/w14040534>
- Wei, A., Bi, P., Guo, J., Lu, S., & Li, D. (2021). Modified DRASTIC model for groundwater vulnerability to nitrate contamination in the Dagujia river basin, China. *Water Supply*, 21(4), 1793–1805. <https://doi.org/10.2166/WS.2021.018>
- Wendland, F., Berthold, G., Blum, A., Elsass, P., Fritsche, J. G., Kunkel, R., & Wolter, R. (2008). Derivation of natural background levels and threshold values for groundwater bodies in the Upper Rhine Valley (France, Switzerland and Germany). *Desalination*, 226(1–3), 160–168. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.240>
- Westenbroek, S., Kelson, V., Dripps, W., Hunt, R., & Bradbury, K. (2010). *SWB – A modified thronthwaite-mather soil-water-balance code for estimating groundwater recharge*. <https://doi.org/10.3133/tm6A31>
- Yang, P., Li, Y., Groves, C., & Hong, A. (2019). Coupled hydrogeochemical evaluation of a vulnerable karst aquifer impacted by septic effluent in a protected natural area. *Science of the Total Environment*, 658, 1475–1484. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.172>
- Ying, X., Zeng, G. M., Chen, G. Q., Tang, L., Wang, K. L., & Huang, D. Y. (2007). Combining AHP with GIS in synthetic evaluation of eco-environment quality-A case study of Hunan Province, China. *Ecological Modelling*, 209(2–4), 97–109. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.06.007>
- Yu, H., Wu, Q., Zeng, Y., Zheng, L., Xu, L., Liu, S., & Wang, D. (2022). Integrated variable weight model and improved DRASTIC model for groundwater vulnerability assessment in a shallow porous aquifer. *Journal of Hydrology*, 608, 127538. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127538>

- Zanotti, C., Caschetto, M., Bonomi, T., Parini, M., Cipriano, G., Fumagalli, L., & Rotiroti, M. (2022). Linking local natural background levels in groundwater to their generating hydrogeochemical processes in Quaternary alluvial aquifers. *Science of the Total Environment*, 805, 150259. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150259>
- Zhang, Y., Wu, J., & Xu, B. (2018). Human health risk assessment of groundwater nitrogen pollution in Jinghui canal irrigation area of the loess region, northwest China. *Environmental Earth Sciences*, 77. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7456-9>
- Zwahlen, F. (2004). *COST Action 620: Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers: final report*. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/be3c99bf-1a0a-4213-b35d-c3faffcd355b>

Anexos

Anexo A

Inventario actualizado de puntos de agua subterránea del Sistema Acuífero del Miembro Superior de la Formación Los Santos (K1lsms).

En la Tabla 1A se enlistan los puntos de agua subterránea que hacen parte del inventario actualizado los cuales cuentan con georreferenciación de alta precisión y monitoreo de características fisicoquímicas.

Tabla 1A

Datos del inventario actualizado de puntos de agua subterránea del Sistema Acuífero del Miembro Superior de la Formación Los Santos (K1lsms).

ID	COORDENADAS PLANAS MAGNA SIRGAS BOGOTA ZONE			Acuífero	Profundidad [m]	27 de Abril - 4 de Mayo de 2021					26 - 28 de Junio de 2021					25 - 29 de Octubre de 2021					1 - 4 de Marzo de 2022				
	NORTE	ESTE	ALTURA			N.P. [m]	C.E. [uS/cm]	pH	T. [°C]	O.D. [%]	N.P. [m]	C.E. [uS/cm]	pH	T. [°C]	O.D. [%]	N.P. [m]	C.E. [uS/cm]	pH	T. [°C]	O.D. [%]	N.P. [m]	C.E. [uS/cm]	pH	T. [°C]	O.D. [%]
	A1	1256614.875	1115072.663			1665.735	Somero	7	4.02	190	5.61	20.03	25.2	0.6	247	5.8	19.47	50.1	1.13	177	5.09	19.65	18.8	1.76	253
A2	1255991.558	1115725.218	1689.209	Somero	8.8	1.42	33	5.39	20.61	37.8	0.84	53	5.45	20.35	38.2	0.93	25	4.8	20.29	15	1.86	27	5.85	20.6	62.2
A3	1254702.483	1115207.775	1686.275	Somero	10	0.87	314	6.42	19.98	17.6	0.66	315	6.4	19.9	17	0.82	281	6.19	19.75	29	0.74	**	**	**	**
A4	1254639.608	1115230.844	1691.771	Somero	10.5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	1.87	80	6.25	20.28	38.9
A5	1254785.947	1114989.37	1692.997	Somero	8	0.91	344	6.46	19.99	28.6	0.9	640.00	6.37	19.64	20	0.95	349	5.93	20.96	19.2	3.21	301	6.19	20.09	38.2
A6	1255886.35	1115614.023	1680.847	Somero	8.5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	0.88	69	5.18	21.62	18.9	1.45	75	6.02	21.31	45
A7	1253122.738	1114180.433	1686.373	Somero	7.6	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	3.68	704	5.26	24.03	33.06	5.31	788	5.01	22.5	40.2
A8	1252894.842	1113942.768	1672.961	Somero	8	1.81	328	6.59	21.08	21.7	1.45	328	6.59	21.08	21.7	1.56	**	**	**	**	1.93	**	**	**	**
A9	1252472.593	1113730.787	1635.95	Superior	5.5	2.47	108	5.87	21.27	21.4	1.59	209	5.93	21.54	58.1	2.03	108	6.03	22.04	23	2.01	114	5.98	21.36	28.1
A10	1251447.029	1113781.853	1630.83	Somero	12.8	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	**	195	6.69	22.23	29.4
A11	1248848.063	1114683.55	1727.593	Somero	5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	1.52	107	6.23	20.23	13.7	1.06	114	5.81	20.9	27.7
A12	1248705.32	1110302.681	1683.358	Somero	13.39	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	1.48	**	**	**	**	*	*	*	*	*
A13	1245373.671	1107944.084	1668.523	Superior	4.8	**	231	7.29	19.87	52.6	1.39	706.00	7	21.19	18.7	2.65	335	6.98	23.07	24.2	4.41	383	6.82	20.41	48.4

ID	COORDENADAS PLANAS MAGNA SIRGAS BOGOTA ZONE			Acuífero	Profundidad [m]	27 de Abril - 4 de Mayo de 2021					26 - 28 de Junio de 2021					25 - 29 de Octubre de 2021					1 - 4 de Marzo de 2022				
	NORTE	ESTE	ALTURA			N.P. [m]	C.E. [uS/cm]	pH	T. [°C]	O.D. [%]	N.P. [m]	C.E. [uS/cm]	pH	T. [°C]	O.D. [%]	N.P. [m]	C.E. [uS/cm]	pH	T. [°C]	O.D. [%]	N.P. [m]	C.E. [uS/cm]	pH	T. [°C]	O.D. [%]
A39	1254992.253	1112162.907	1658.976	Superior	8.5	7.25	**	**	**	**	6.82	**	**	**	**	6.56	**	**	**	**	8.06	**	**	**	**
A40	1253003.625	1109449.351	1623.672	Superior	7	5.35	21	6.17	20.33	52.85	**	87.00	6.3	21.53	33.9	3.35	31	5.95	21.42	36.3	4.62	24	6.42	21.29	60.2
A41	1253745.404	1111252.901	1627.625	Superior	18	7.41	47.5	5.94	19.89	43.7	*	*	*	*	*	5.51	78	6.36	21.53	38.3	7.23	47	5.94	22.86	56.1
P1	1257559.716	1112061.933	1608.65	Superior	27	**	116	4.93	19.56	21.2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
P2	1255018.932	1112167.183	1657.858	Superior	22	S.A.	293	5.34	20.77	50.9	S.A.	594.00	6.03	21.17	+	S.A.	358	5.08	21.72	20.6	S.A.	275	5.24	21.15	37.1
P3	1253401.341	1111696.918	1628.779	Superior	^c 55	S.A.	112	6.13	21.02	27.6	S.A.	221	6.25	22.55	53	S.A.	111	6.16	21.12	37	S.A.	106	6.19	20.71	59.4
P4	1252923.728	1113961.631	1677.781	Superior	62	39.16	98	6.16	23.29	28.3	39.39	98.00	6	23.26	26	38.15	88	5.8	22.84	40.8	40.08	93	6.06	23.7	34.4
P5	1252237.384	1114865.826	1671.669	Superior	50	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	17.52	64	6.11	22.87	63.3	16.5	88	6.47	21.07	58.8
P6	1248852.522	1110224.727	1675.727	Superior	55	S.A.	85	6.23	23.22	51.45	S.A.	85	6.23	23.24	54.4	S.A.	75	6.18	22.68	46	*	*	*	*	*
P7	1247295	1110329	1676.164	Superior	^c 33	S.A.	40	5.94	22.47	2.38	S.A.	40	5.94	22.47	32.4	S.A.	37	5.77	23.67	43.4	*	*	*	*	*
P8	1247646.698	1110357.687	1678.165	Superior	29	S.A.	22	5.84	19.40	62.57	S.A.	22	5.98	19.36	67.3	S.A.	25	6.42	22.92	58.2	S.A.	18	5.81	20.38	70.7
P9	1251361.349	1110874.391	1628.856	Superior	58	S.A.	25	5.55	21.63	61.03	S.A.	33.00	5.05	21.54	46.6	S.A.	30	5.37	23.08	15.5	S.A.	16	5.83	23.31	66.8
P10	1251447.029	1113781.853	1630.83	Superior	55	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
M1	1251226.766	1115624.334	1675.841	Superior	N.A.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	N.A.	33	5.78	19.5	28.1	N.A.	38	6.4	18.45	42.7
M2	1244009.963	1107357.89	1641.812	Superior	N.A.	N.A.	29	8.08	22.50	95.3	N.A.	86	6.23	24.41	43.1	N.A.	33	7.14	25.28	33.3	N.A.	48	6.88	22.28	32.6
M3	1245239.895	1107521.756	1650.449	Superior	N.A.	*	*	*	*	*	N.A.	43	5.41	22.22	48.1	N.A.	32	6.5	23.94	43.2	N.A.	23	6.9	20.55	63.2
M4	1244401.102	1108722.339	1616.946	Superior	N.A.	N.A.	15	7.26	22.41	46.35	N.A.	15	7.34	22.43	48.1	N.A.	19	7.6	24.11	47.1	N.A.	15	7.42	22.75	48.3
M5	1246228.601	1107508.828	1657.054	Superior	N.A.	N.A.	19	6.54	21.47	53.15	N.A.	45.00	6.49	24.5	66.1	N.A.	21	7.47	25.96	61	N.A.	18	7.09	22.56	77.3
M6	1246257.641	1114348.609	1712.507	Superior	N.A.	N.A.	94	6.00	19.54	24	*	*	*	*	*	N.A.	35	6.58	20.16	43.2	N.A.	47	6.2	20.46	65.3

* Nota. A: aljibe; P: pozo; M: manantial *: punto no visitado; **: dato no medido; N.A.: no aplica; N.D.: nivel dinámico; S.A.: sin acceso; S.I.: sin información; ^a Información obtenida por divulgación del propietario o administrador del predio; ^b Información obtenida por revisión del informe de perforación; ^c Información obtenida a través del inventario de Pinto et al., (2007); ^d Información obtenida a través del inventario de Becerra y Parra (2016); ^e Información obtenida de informes de Geoelectrica.

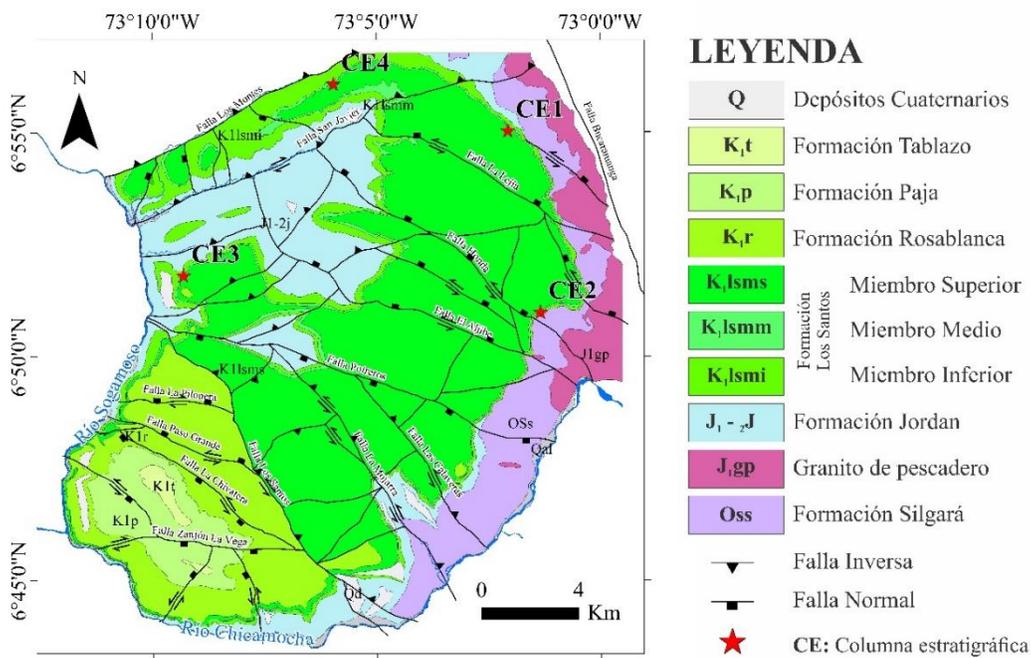
Anexo B

Características estratigráficas del Miembro Superior de la Formación Los Santos (K₁lsms).

En la gráfica a continuación se presenta la localización de las columnas estratigráficas levantadas por Rincón (2008) en los sectores La Punta, El Carrizal y por Aldana (2008) en la Navarra y El Calicho, las cuales fueron revisadas en campañas de campo con el fin de precisar el espesor del Miembro Superior de la Formación los Santos (K₁lsms) y las características de las rocas que lo conforman.

Figura 1B

Localización de columnas estratigráficas que definen los miembros de la Formación Los Santos.



*Nota: CE1: columna estratigráfica en el sector La Punta; CE2: columna estratigráfica en el sector El Carrizal; CE3: columna estratigráfica en el sector El Calicho; CE4: columna estratigráfica en el sector La Navarra. Sistema de Referencia MAGNA Colombia Bogotá.

El miembro Superior de la Formación los Santos (K₁lsms) presenta las siguientes características en cada uno de los sectores revisados:

- Sector La Punta (CE1): Presenta un espesor total de 48.7 m el cual está altamente diaclasado, mostrando evidencia de flujo de agua en su parte media. De base a tope expone:
 - 9.35 m de cuarzoarenitas de grano fino alternadas con capas con gradación normal de grano medio a muy fino y de grano fino a grano muy fino, en su parte intermedia contiene una capa delgada de arcillolita
 - 4.4 m de cuarzoarenitas y subarcosas de grano fino y muy fino
 - 5.55 m de cuarzoarenitas en capas de grano medio y capas con gradación normal de grano medio a fino y de grano fino a muy fino con intraclastos de limolita de color verde pálido y rojizo. En la base del tramo presenta arcillolita limosa y hacia el tope una capa de arcillolita limosa.
 - 4.6 m de cuarzoarenitas con gradación normal de grano medio a fino intercaladas con capas de grano fino y arcillolitas limosas.
 - 7.05 m de sublitarenitas, cuarzo arenitas y subarcosas de grano muy fino y grano medio con intraclastos arcillosos de color verdoso. En la parte intermedia presenta lentes de arcillolitas con 9 cm de espesor y 60 cm de largo.
 - 5.4 m de subarcosas y sublitarenitas con granos medios en su parte más baja y fino en la parte más alta.
 - 3.2 m de subarcosas y sublitarenitas de grano medio, alternada con capas de grano fino y grano grueso.

- 9.15 m de limolita intercaladas con capas de subarcosas de grano fino
- Sector El Carrizal (CE2): Presenta un espesor total de 33 m. De base a tope expone:
 - 3.1 m de cuarzoarenitas en capas de grano fino a medio con intraclastos de arcillolita.
 - 3.6 m de cuarzoarenitas a sublitarenitas en capas de grano grueso intercaladas con capas de grano fino y medio.
 - 3.9 m de cuarzoarenitas de grano medio, muy cementadas y limpias.
 - 2.6 m de cuarzoarenitas de grano fino muy cementadas y limpias.
 - 7.2 m de sublitarenitas, subarcosas y cuarzoarenitas en capas de grano grueso intercaladas con capas de grano medio y fino con intraclastos de arcillolita.
 - 6.7 m de subarcosas de grano grueso intercaladas con capas de grano medio
 - 5.9 m de sublitarenitas y cuarzoarenitas de grano medio con un segmento intermedio de lodolitas.
- Sector El Calicho (CE3): Presenta un espesor total de 55 m. De base a tope expone:
 - 19 m de cuarzoarenitas y sublitarenitas de grano fino muy fino y limolitas.
 - 34 m de cuarzoarenitas de grano fino y muy fino bien cementadas con marcas de bioturbación.
 - 5 m de sublitarenitas de grano muy fino y fino.
- Sector La Navarra (CE4): Presenta un espesor total de 54 m. De base a tope expone:
 - 11.6 m de sublitarenitas en capas granodecrecientes de grano fino a muy fino intercalado con capas delgadas de lodolitas y arcillolitas.

- 15.2 m de sublitarenitas en capas con gradación normal de conglomerados arenosos y areniscas conglomeráticas con granos de tamaño desde granulo a arena gruesa, finalizando con capas de grano fino.
- 27.2 m de cuarzoarenitas y sublitarenitas de grano muy fino, fino y medio bien cementado.

Anexo C

Descripción del código Soil Water Balance (SWB).

Teoría del modelo SWB

Tal como se indica en el apartado 6.2, el código SWB calcula la recarga potencial mediante un balance de humedad en el suelo. La recarga se calcula por separado para cada celda de la cuadrícula en el dominio del modelo. Las fuentes y sumideros de agua dentro de cada celda de la cuadrícula se determinan sobre la base de los datos climáticos de entrada y las características del paisaje; la recarga se calcula como la diferencia entre el cambio en la humedad del suelo y estas fuentes y sumideros como se indica en la Ecuación 1C:

$$R = (P + E) - (I + PER + ET) - \Delta Hs \quad (1C)$$

Donde R es la recarga, E las entradas, I la intercepción, PER las pérdidas, y ΔHs la humedad del suelo.

Cada uno de los componentes del balance hídrico dados en la Ecuación 1C es manejado por uno o más módulos dentro del código SWB. A continuación, se muestran los componentes específicos del equilibrio hídrico:

- ***Precipitación:*** Los datos de precipitación se ingresan como valores diarios, ya sea como una serie de tiempo en un solo medidor o como una serie de archivos de cuadrícula *Arc ASCII* o *Surfer* diarios creados por el usuario.
- ***Entradas:*** El flujo de entrada se calcula mediante el uso de una cuadrícula de dirección de flujo derivada de un modelo de elevación digital para enrutar el flujo de salida (escorrentía

superficial) a celdas de cuadrícula de pendiente descendente adyacentes. El flujo de entrada se considera cero si el enrutamiento de flujo está desactivado.

- *Intercepción:* La interceptación se trata simplemente por medio de un enfoque de modelo de “cubeta”: se supone que una cantidad de lluvia especificada por el usuario queda atrapada y utilizada por la vegetación y se evapora o transpira de la superficie de la planta. Los valores diarios de precipitación deben exceder la cantidad de interceptación especificada antes de que se asuma que el agua llega a la superficie del suelo. Los valores de interceptación pueden especificarse para cada tipo de uso de la tierra y temporada (en crecimiento y en inactividad).
- *Pérdidas:* El flujo de salida (o la escorrentía superficial) de una celda se calcula mediante el uso del número de curva (definido por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales del Departamento Agrícola de los Estados Unidos ha categorizado) y la relación lluvia-escorrentía. Esta relación lluvia-escorrentía se basa en cuatro propiedades de la cuenca: tipo de suelo, uso de la tierra, condición de la superficie y condición previa de la escorrentía.
- *Evapotranspiración:* El código SWB puede usar cualquiera de los cinco métodos comúnmente aplicados para estimar la evapotranspiración potencial. Los métodos incluidos actualmente en el código SWB son: (1) Thornthwaite-Mathe; (2) Jensen-Haise, (3) Blaney-Criddle, (4) Turc y (5) Hargreaves y Samani. El método de Hargreaves-Samani es el único que puede producir una estimación espacialmente variable de la evapotranspiración potencial.
- *Humedad del suelo:* El término humedad del suelo representa la cantidad de agua almacenada en el suelo para una celda determinada de la cuadrícula. La humedad del suelo

tiene un límite superior que corresponde a la capacidad máxima de retención de agua del suelo (aproximadamente equivalente a la capacidad de campo) y un límite inferior que corresponde a la capacidad de marchitamiento del suelo. Si la humedad del suelo alcanza la capacidad máxima de humedad del suelo, cualquier exceso de precipitación se agrega al valor excedente diario de humedad del suelo. En la mayoría de las condiciones, el valor excedente de humedad del suelo es equivalente al valor diario de recarga de agua subterránea.

Requisitos de datos para la aplicación del modelo SWB

Para la estimación de la recarga, el código SWB requiere que el usuario proporcione datos de la superficie terrestre en formato de cuadrículas y datos climatológicos en formato tabular. A continuación, se describen los datos ingresados para este proyecto en cada formato (cuadrícula y tabular), el cual usó como método de ET el método de Hargreaves-Samani:

Conjunto de datos en formato de cuadrícula

Se requirió de cuatro conjuntos de datos en cuadrícula: (1) grupo hidrológico de suelos, (2) coberturas, (3) capacidad de suelo-agua disponible y (4) dirección del flujo de agua superficial. Estos fueron ingresados con una resolución espacial de 12.5 m x 12.5 m.

- *Grupo hidrológico de suelo:* El Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS, por sus siglas en inglés) del Departamento Agrícola de los Estados Unidos ha categorizado la serie de suelos en cuatro grupos hidrológicos de A a D sobre la base de capacidad de infiltración como se muestra en la Tabla 1C.

Tabla 1C

Tasas de infiltración para grupos de suelos hidrológicos del servicio de conservación de recursos naturales. Tomado de: Cronshey et al. 1986

Grupo de suelo	Rata de infiltración (in/hr)
A	> 0.3
B	0.15 - 0.3
C	0.05 - 0.15
D	< 0.05

* *Nota:* in: pulgadas; hr: hora

Para este proyecto, los grupos hidrológicos fueron asignados teniendo en cuenta los porcentajes de materiales finos, arenas y gravas de las muestras de suelo tomadas, como se muestra en la Tabla 2E.

Tabla 2C

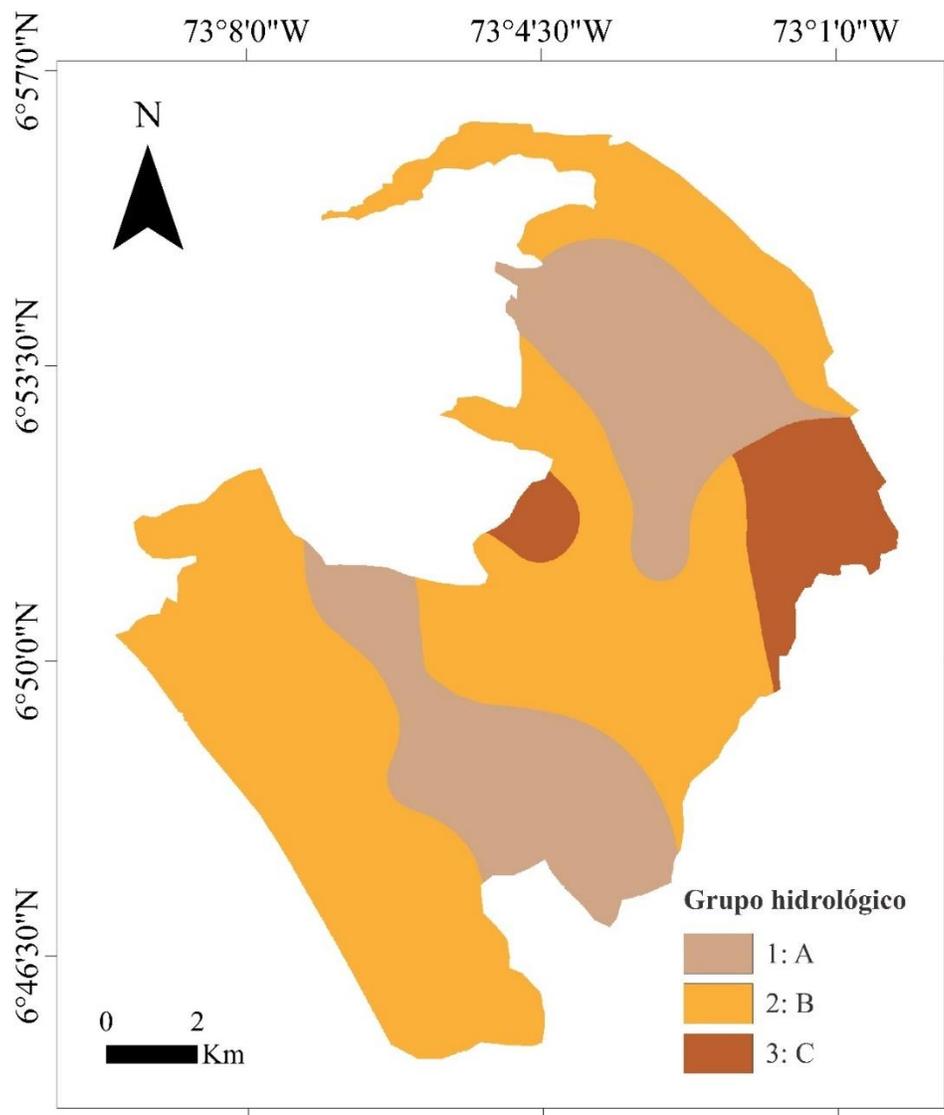
Grupos hidrológicos correspondiente a cada muestra de suelo.

Muestra	Grupo hidrológico	Muestra	Grupo hidrológico
MLS-SP1	B	MLS-SP12	A
MLS-SP2	A	MLS-SP13	C
MLS-SP3	B	MLS-SP14	B
MLS-SP4	A	MLS-SP15	B
MLS-SP5	A	MLS-SP16	A
MLS-SP6	B	MLS-SP17	A
MLS-SP7	B	MLS-SP18	A
MLS-SP8	A	MLS-SP19	C
MLS-SP9	B	MLS-SP20	B
MLS-SP10	B	MLS-SP21	B
MLS-SP11	B	MLS-SP22	B

Estos valores ingresaron al modelo en una cuadrícula de enteros en formato *Arc ASCII* con valores desde el 1 (grupo de suelos A) al 4 (grupo de suelos D). En la Figura 1C se muestra la distribución espacial de los grupos hidrológicos de suelos.

Figura 1C

Distribución en el espacio de los grupos hidrológicos de suelos.



* Nota: Sistema de Referencia MAGNA Colombia Bogotá.

- *Cobertura del suelo:* La cobertura de la tierra, junto a la capacidad de suelo-agua disponible le permite al código calcular la escorrentía superficial y asignar una capacidad máxima de retención de humedad del suelo para cada celda de análisis. La información de coberturas se obtuvo a partir de los mapas de coberturas de suelos realizados por Romero y Urrea (2021) y Moreno y Silva (2021). Este se muestra en la Figura 2C.
- *Capacidad de agua disponible:* A cada tipo de suelo debe asignársele una capacidad de agua disponible la cual es usada por el código junto a información de coberturas (con su profundidad de raíces) para calcular la capacidad máxima de retención de agua del suelo (C_{max}) para cada celda de análisis como se muestra en la Ecuación 2C (McNutt & Salazar, 2010):

$$C_{max} = C_{H_2O} \times P_r \quad (2C)$$

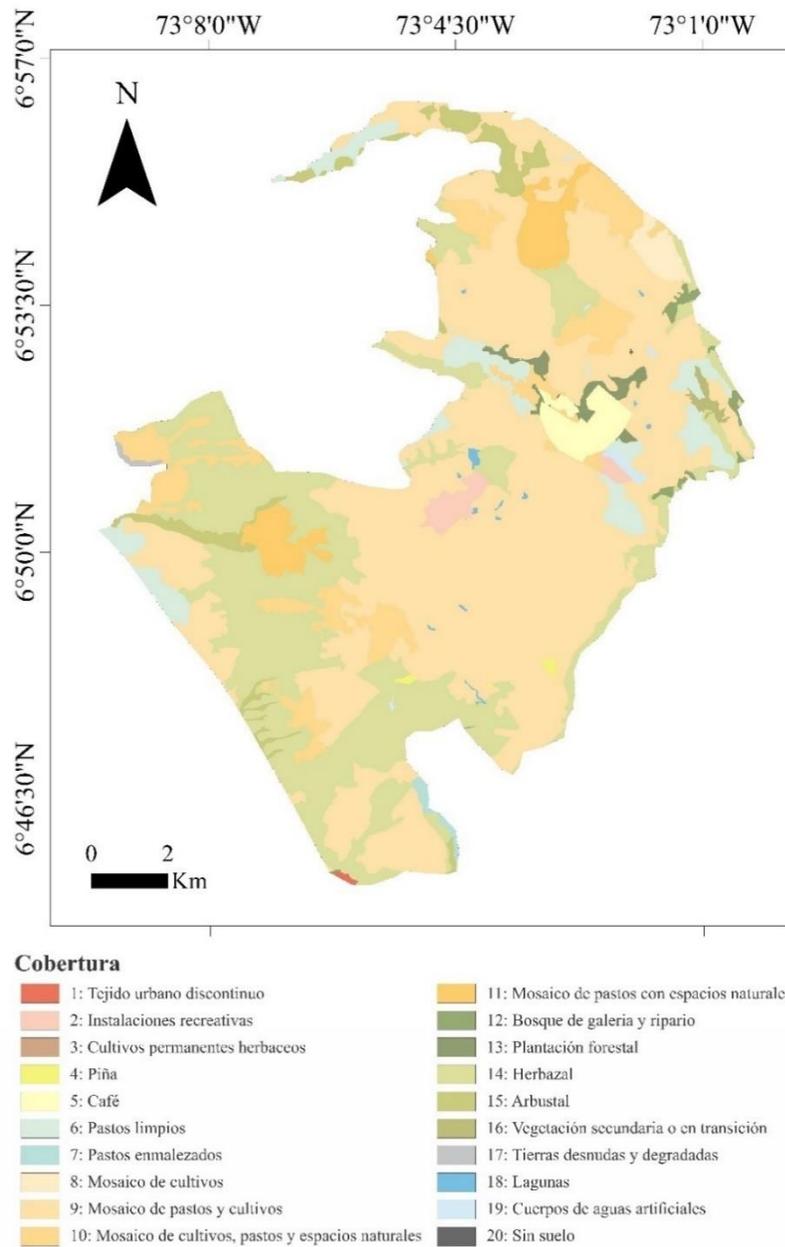
Donde C_{H_2O} corresponde a la capacidad de agua del suelo disponible y P_r corresponde a la profundidad de las raíces. P_r fue medido en campo y se incluye en la sección de datos en formato tabular de este anexo (Tabla 7C). El agua agregada a la columna de suelo en exceso de C_{max} se recargará.

Para este proyecto de investigación, se asignaron valores de capacidad de agua disponible de acuerdo con la información textural y los grupos hidrológicos asignados a los suelos muestreados para el proyecto, teniendo como valores base los propuestos para cada grupo textural por Thornthwaite & Mather (1957). En la Figura 3C se muestra la distribución de la capacidad de agua en el área de estudio ingresada al código.

Figura 2C

Coberturas de suelo en la extensión del Miembro Superior de la Formación Los Santos (Kílsms).

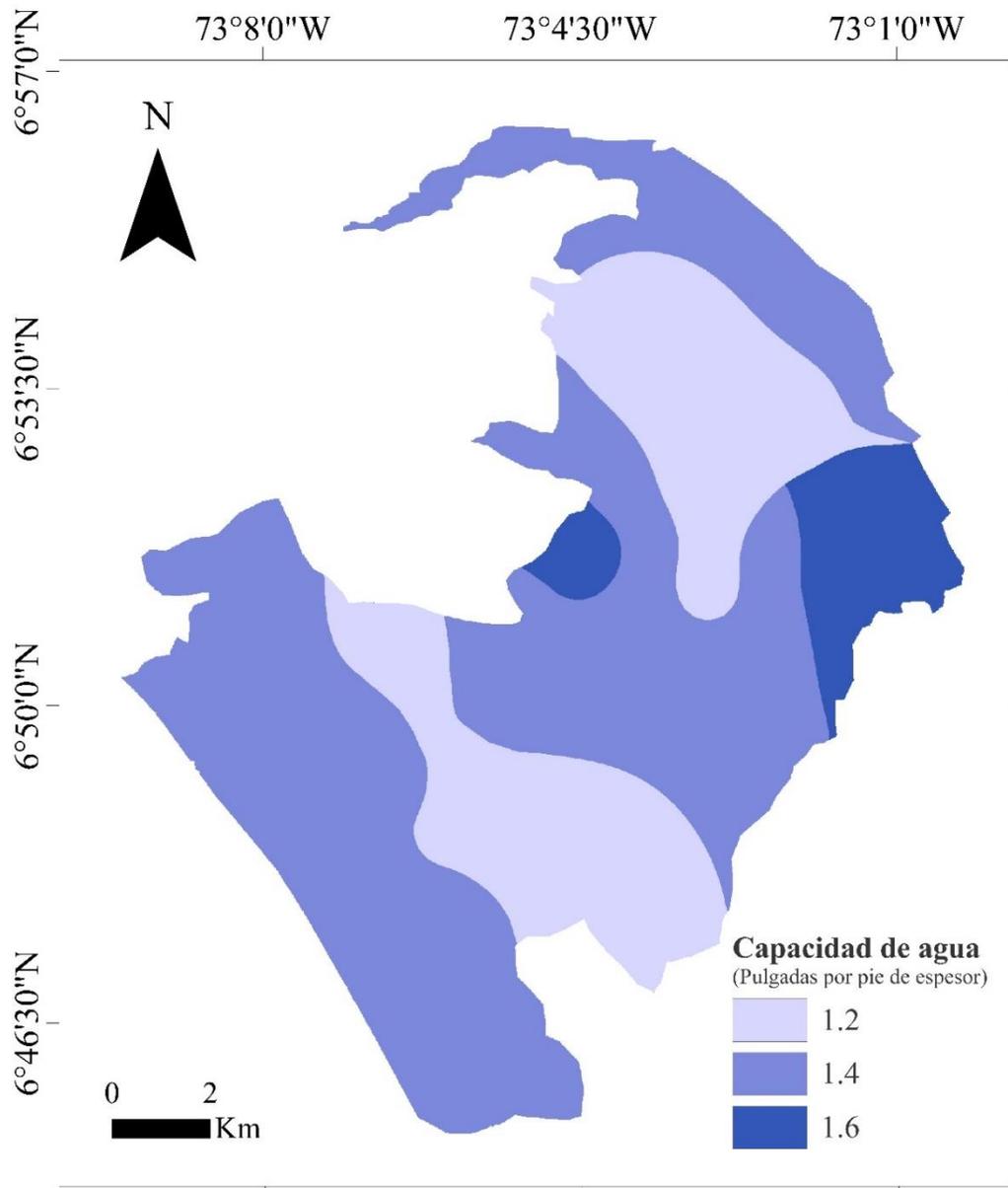
Adaptado de: Romero y Urrea (2021) y Moreno y Silva (2021).



* Nota: Sistema de Referencia MAGNA Colombia Bogotá.

Figura 3C

Capacidad de agua disponible en la extensión del Miembro Superior de la Formación Los Santos (Klsms).

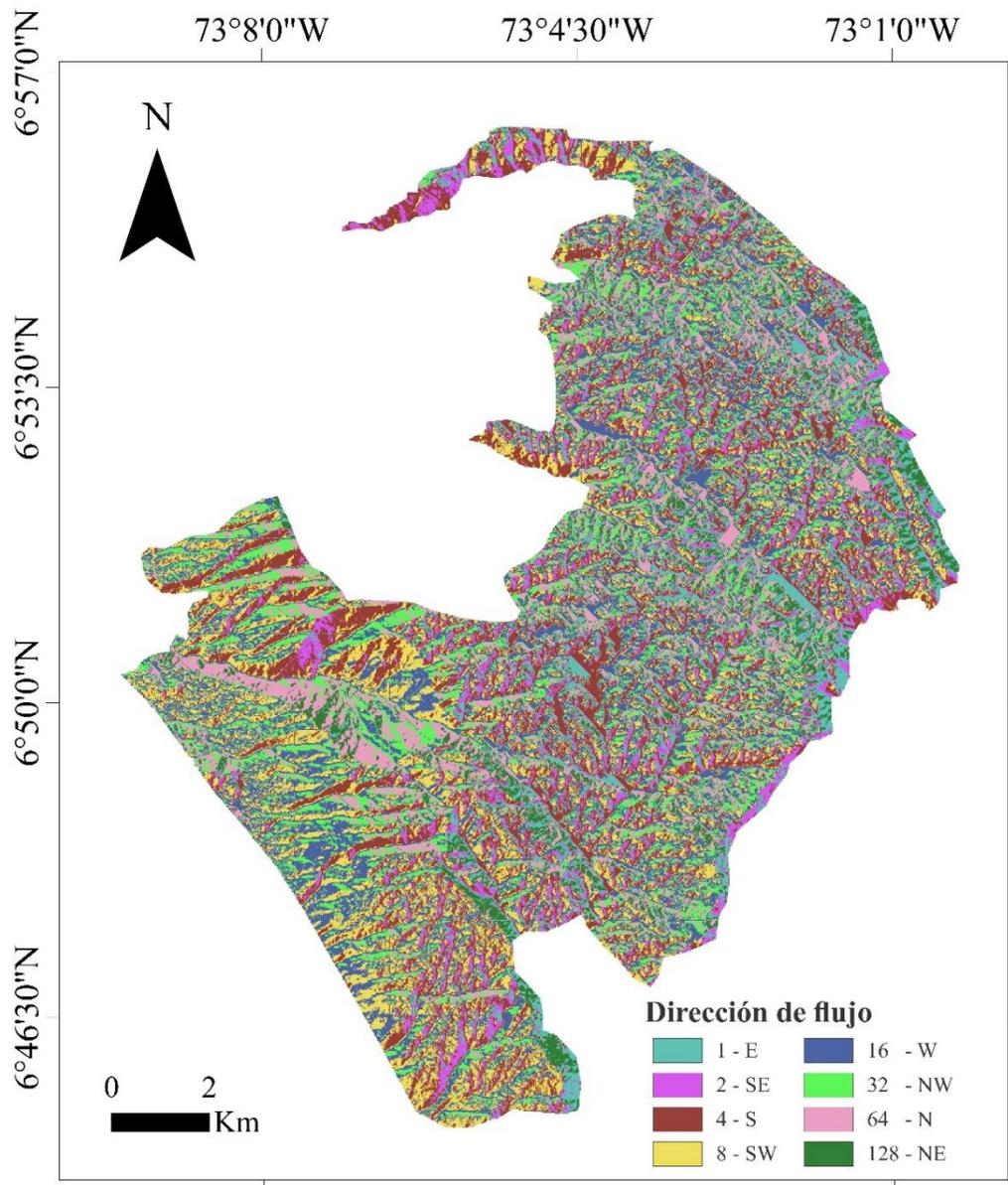


* Nota: Sistema de Referencia MAGNA Colombia Bogotá.

- *Dirección del flujo de agua superficial:* El código requiere una cuadrícula de dirección de flujo que permite definir la dirección de escurrimiento entre celdas, y con ello, determinar las *E* y las *PER* de agua del modelo de balance de humedad de suelo. Esta capa se obtuvo a partir de la herramienta *Flow Direction* de Arcgis aplicada a una imagen DEM obtenida de manera gratuita de la página Alaska Satellite Facility (<https://search.asf.alaska.edu/#/>). En la Figura 4C se muestran los valores adquiridos para cada celda del área de estudio, los cuales, mediante el algoritmo de enrutamiento de flujo D8 definen la dirección del agua asumida por el código como se muestra en la leyenda del mapa.
- *Precipitación:* La precipitación se ingresó al código como cuadrículas diarias de precipitaciones espacializadas a partir de los datos obtenidos de las lluvias diarias por un año (1 octubre de 2020 y 30 de septiembre de 2021) de la estación pluviométrica *La Mesa* del IDEAM, la estación automática *Llanadas* del GPH y una estación pluviométrica privada perteneciente a una de las propiedades de la Mesa de los Santos (Detalles de las estaciones en la Tabla 2 del documento principal). Por la densidad de estos datos (365 capas espacializadas) estos serán reservados, sin embargo, en la Tabla 3C y la Figura 4C se muestra un comportamiento generalizado de las precipitaciones a escala mensual. La distribución anual de las lluvias para el periodo de análisis se presenta en la Figura 5C.

Figura 3C

Dirección de flujo de cada celda en la extensión del Miembro Superior de la Formación Los Santos (Kllsms).



* Nota: Sistema de Referencia MAGNA Colombia Bogotá.

Tabla 4C

Precipitación mensual y anual en las estaciones La Mesa, Llanadas y Privada, Mesa de os Santos.

Periodo	Precipitación (mm)		
	La Mesa	Llanadas	Privada
1-31/oct/2020	69.80	161.40	166.90
1-30/nov/2020	37.30	77.20	177.00
1-31/dic/2020	5.20	58.00	21.00
1-31/ene/2021	0.00	9.00	0.00
1-28/feb/2021	58.60	146.60	99.30
1-31/mar/2021	27.80	46.60	46.10
1-30/abr/2021	0.00	84.20	48.00
1-31/may/2021	74.60	114.60	124.90
1-30/jun/2021	17.70	198.40	86.00
1-31/jul/2021	9.40	36.00	63.70
1-31/ago/2021	130.20	123.80	172.00
1-30/sep/2021	107.60	66.60	74.70
Total	538.20	1126.40	1085.90

Figura 4C

Variación mensual de la precipitación en las estaciones La Mesa, Llanadas y Privada (1 oct 2020-30sep2021), Mesa de Los Santos.

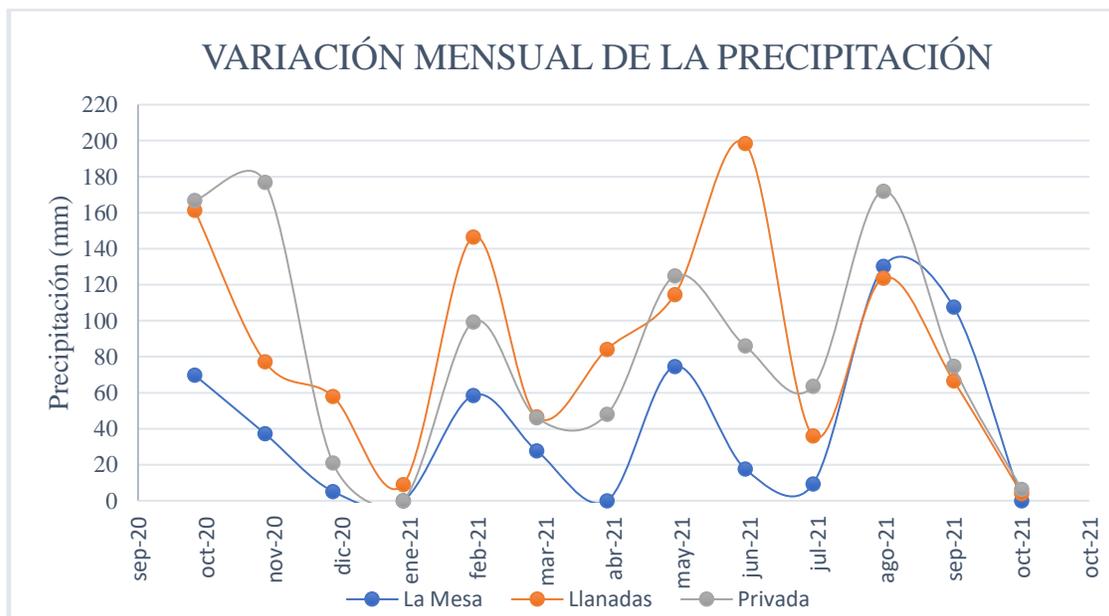
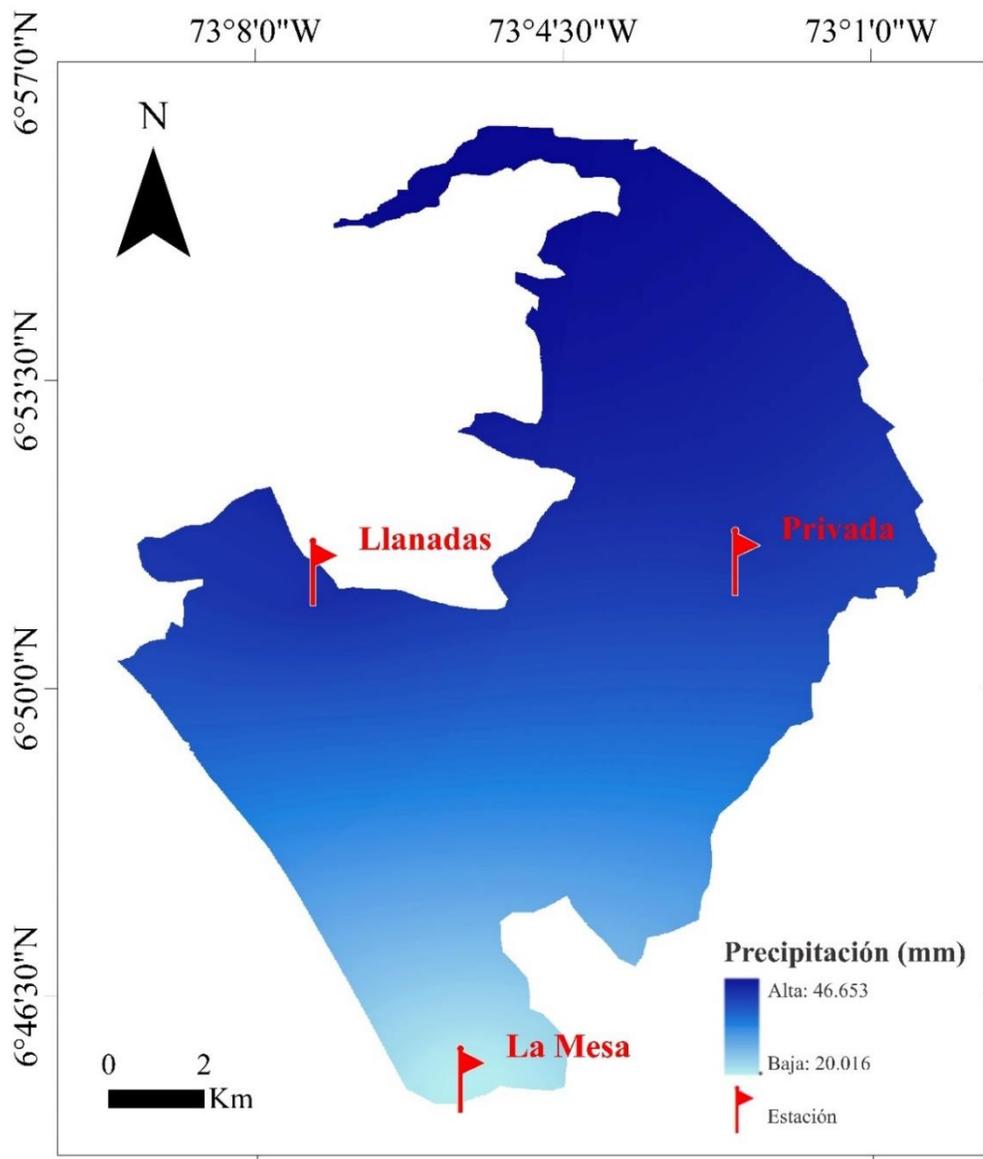


Figura 5C

Comportamiento de la lluvia anual (1/oct/2020 – 30/sep/2021) a partir de los datos de las estaciones La Mesa, Llanadas, y Privada en la extensión del Miembro Superior de la Formación Los Santos (Kilms).



* Nota: Sistema de Referencia MAGNA Colombia Bogotá.

Conjunto de datos en formato tabular

Adicionalmente, el modelo requirió de datos tabulados correspondientes a: (1) Datos diarios climatológicos, (2) Tabla de búsqueda y (3) Tabla de retención de agua del suelo. Estas se describen a continuación:

- *Datos diarios climatológicos:* Los datos climatológicos ingresaron al código en valores diarios tabulados en un documento de tipo texto con un encabezado como se muestra en la tabla 5C. Debido a la densidad de datos, estos fueron resumidos en promedios mensuales para el año de análisis (1 octubre de 2020 y 30 de septiembre de 2021) en la Tabla 6C.

Tabla 5C

Encabezado de la tabla de datos diarios climatológicos.

M	D	Y	TAVG (F)	Precipitation (in)	Avg Rel Hum (%)	TMAX (F)	TMIN (F)	WINDVEL (m/sec)	Min Rel Hum (%)	Sunshine
---	---	---	-------------	-----------------------	-----------------------	-------------	-------------	--------------------	-----------------------	----------

* *Nota:* M: mes; D: día; Y: año; TAVG: temperatura promedio del aire, F: Fahrenheit; in: pulgadas;

m/sec: metro por segundo.

Tabla 6C

Datos climatológicos promedios mensuales. Obtenidos de la estación Llanadas.

Periodo	Tprom (°C)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	HRprom (%)	HRmin (%)	VV (m/s)	Brillo solar (%)
1-31/oct/2020	21.08	27.47	17.55	82.28	58.68	0.7029	63.85
1-30/nov/2020	20.50	24.29	16.39	87.14	68.43	0.6586	62.90
1-31/dic/2020	21.00	24.87	18.26	84.42	65.19	0.6007	64.43
1-31/ene/2021	21.33	26.96	18.00	79.57	57.35	0.6682	65.61
1-28/feb/2021	21.15	26.65	16.81	83.99	65.89	0.6455	64.49
1-31/mar/2021	20.94	26.55	17.77	82.68	62.65	0.6978	47.25
1-30/abr/2021	21.44	27.56	18.27	83.91	61.40	0.6611	41.68
1-31/may/2021	21.32	27.30	18.08	85.61	65.03	0.6289	45.12
1-30/jun/2021	20.68	26.38	17.61	87.53	69.03	0.5991	44.95
1-31/jul/2021	21.58	28.09	18.00	82.19	59.74	0.6064	50.66
1-31/ago/2021	20.83	25.93	17.50	85.40	63.61	0.6362	51.99
1-30/sep/2021	21.16	26.08	17.54	84.36	61.27	0.6351	57.07

* *Nota:* Tprom: temperatura promedio; Tmax: temperatura máxima; HRprom: humedad relativa promedio; HRmin: humedad relativa mínima; VV: velocidad del viento.

- *Tabla de búsqueda:* El código SWB solicita una tabla de búsqueda de cobertura de la tierra donde se le asigna código, descripción, datos de número de curva asociado a la escorrentía, recarga máxima, interceptación y profundidad de enraizamiento para cada tipo de suelo (A-D). Los datos ingresados se muestran en la Tabla 7C.
- *Tabla de retención de agua del suelo:* Los valores de retención de humedad del suelo se utilizan para calcular los cambios en la humedad del suelo durante períodos de evapotranspiración potencial que se encuentran por debajo de la precipitación. El código SWB utiliza la pérdida de agua potencial acumulada junto con la capacidad máxima de humedad del suelo de una celda para determinar la cantidad de humedad del suelo que permanecería en tales condiciones. La tabla incluida con el código SWB es una versión

modificada de las tablas originales de Thornthwaite & Mather (1957) que se muestra en la Figura 6C.

Tabla 7C

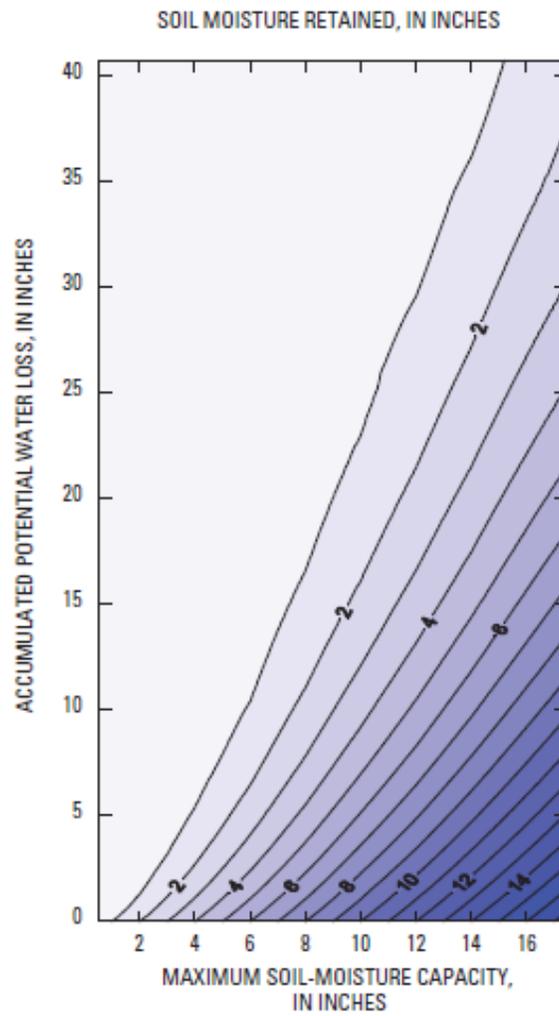
Tabla de búsqueda de suelo y tipo de suelo.

Código de uso	Descripción	Número de curva asociado a la escurrentía				Recarga Máxima				Intercepción		Profundidad de la zona de raíces (ft)			
		A	B	C	D	A	B	C	D	Temporada de crecimiento	Temporada de no crecimiento	A	B	C	D
1	Tejido Urbano Discontinuo	98	98	98	98	7.2	3.6	1.2	0.5	0	0	0	0	0	0
2	Instalaciones recreativas	49	69	79	84	7.2	3.6	1.2	0.5	0	0	0.33	0.33	0.13	0.13
3	Cultivos permanentes herbáceos	62	71	78	81	7.2	3.6	1.2	0.5	0.02	0	1.23	1.23	0.73	0.73
4	Piña	62	71	78	81	7.2	3.6	1.2	0.5	0	0	1.23	1.23	0.73	0.73
5	Café	62	71	78	81	7.2	3.6	1.2	0.5	0	0	1.64	1.64	1.14	1.14
6	Pastos limpios	39	61	74	80	7.2	3.6	1.2	0.5	0	0	0.33	0.33	0.13	0.13
7	Pastos enmalezados	68	79	86	89	7.2	3.6	1.2	0.5	0	0	1.23	1.23	0.73	0.73
8	Mosaico de cultivos	62	71	78	81	7.2	3.6	1.2	0.5	0	0	1.23	1.23	0.73	0.73
9	Mosaico de pastos y cultivos	39	61	74	80	7.2	3.6	1.2	0.5	0	0	1.23	1.23	0.73	0.73
10	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	39	61	74	80	7.2	3.6	1.2	0.5	0	0	1.23	1.23	0.73	0.73
11	Mosaico de pastos con espacios naturales	39	61	74	80	7.2	3.6	1.2	0.5	0	0	1.23	1.23	0.73	0.73
12	Bosque de galería y ripario	25	55	70	77	7.2	3.6	1.2	0.5	0.05	0	2.46	2.46	1.96	1.96
13	Plantación forestal	25	55	70	77	7.2	3.6	1.2	0.5	0.05	0	2.46	2.46	1.96	1.96
14	Herbazal	39	61	74	80	7.2	3.6	1.2	0.5	0.05	0	1.23	1.23	0.73	0.73
15	Arbustal	25	55	70	77	7.2	3.6	1.2	0.5	0.05	0	1.23	1.23	0.73	0.73
16	Vegetación secundaria o en transición	39	61	74	80	7.2	3.6	1.2	0.5	0.05	0	1.64	1.64	1.14	1.14
17	Tierras desnudas y degradadas	45	66	77	83	7.2	3.6	1.2	0.5	0.05	0	0	0	0	0
18	Lagunas	30	58	71	78	7.2	3.6	1.2	0.5	0	0	0	0	0	0
19	Cuerpos de agua artificiales	30	58	71	78	7.2	3.6	1.2	0.5	0	0	0	0	0	0
20	Sin suelo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

* Nota. ft: pie

Figura 6C

Tabla de retención de humedad del suelo (basada en Thornthwaite & Mather, 1957). Fuente: (Westenbroek et al., 2010)



Anexo D*Determinación textural de suelos.****Protocolo de laboratorio para determinación de textura de suelos***

Para la determinación de las texturas de suelos de la zona de estudio, se siguió de manera estricta las pautas establecidas por la norma internacional ASTM 422-63, la cual indica el método de prueba estándar para el análisis del tamaño de las partículas de suelo. Como indica la norma, una vez secada la muestra, es necesario pasar la misma por la malla #200 con el fin de separar las partículas mayores y menores de 75 μm . La distribución de tamaño de partículas retenidas en la malla #200 ($> 75 \mu\text{m}$) es determinada por tamizado, mientras que la distribución de tamaño de las partículas que pasan la malla ($> 75 \mu\text{m}$) debe ser determinado por un proceso de sedimentación usando un hidrómetro. A continuación, se resume el proceso de tamizado y de la prueba de sedimentación.

- Granulometría por tamizado
 - Equipos: Juego de tamices y balanza
 - Procedimiento:

1. Se selecciona un tamaño de muestra apropiado según indica la Tabla 1D:

Tabla 1D

Tamaño de muestra de suelo para prueba por tamizado.

Diámetro Nominal de las partículas más grandes – pulg (mm)	Porción Aproximada de Masa Mínima (g)
3/8 (9.5)	500
3/4 (19.0)	1 000
1 (25.4)	2 000
1 1/2 (38.1)	3 000
2 (50.8)	4 000
3 (76.2)	5 000

2. Se ingresa la muestra a un juego de tamices organizadas de mayor a menor espaciamiento. Para este proyecto se usaron los tamices con mallas #4, #5, #10, #18, #35, #40, #60 y #200.
3. Una vez ingresada la muestra, se procede a realizar movimientos laterales y verticales del juego de tamices acompañado de sacudidas con el fin de mantener la muestra continuamente en movimiento sobre la superficie de las mallas.
4. Se separa el juego de tamices para determinar la porción de masa de suelo retenida por cada malla con ayuda de una balanza. Los datos se registran (ver Tabla 2D) para realizar de manera ordenada cada cálculo requerido.
5. Se suman las masas retenidas con el fin de verificar que la suma de las masas en todas las mallas sea aproximadamente igual a la masa que ingresa al juego de tamices.
6. Se calcula la diferencia entre el peso inicial de la muestra y el peso final, así como el error asociado, verificándose que este no sea mayor al 1% (Ecuación 1D) para que la practica sea aceptada. En caso de que el error sea mayor, la prueba debe repetirse.

$$\% \text{ Error} = \frac{(\text{Peso inicial de muestra} - \text{Total retenido})}{\text{Peso inicial de la muestra}} * 100 \quad (1D)$$

7. En caso de obtener diferencias entre el peso inicial y el peso retenido por el juego de tamices, se debe corregir el peso retenido, distribuyendo la diferencia de masas en el total de tamices donde se retuvo material.

Tabla 2D

Tabla para datos obtenidos por prueba de tamizado.

Peso Inicial (g):		Tamaño máximo de partícula (mm):				
Abertura del Tamiz		Peso Retenido (g)	Peso Retenido corregido (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)
Nº	(mm)					
4	4.75					
5	4					
10	2					
18	1					
35	0.5					
40	0.425					
60	0.25					
200	0.075					
Tara						
Total retenido						
Diferencia						
Error %						

8. A partir del porcentaje retenido corregido, se calcula el porcentaje retenido de cada malla como indica la Ecuación 2D:

$$\% \text{ Retenido por malla} = \frac{\text{Peso retenido corregido por malla}}{\text{Peso inicial de la muestra}} * 100 \quad (2D)$$

9. Se calcula el porcentaje retenido acumulado de cada malla.

10. Se calcula el porcentaje pasante asociado a cada número de malla, siguiendo la Ecuación 3D

$$\% \text{ Pasante} = 100 - \% \text{ retenido acumulado por malla} \quad (3D)$$

11. Se procede a construir la curva granulométrica que corresponde a una gráfica semilogarítmica del % Pasante vs. el diámetro que pasa (en mm)

- Prueba de hidrometría: la prueba de hidrometría se rige por la ley de Stokes la cual establece que la velocidad de sedimentación de una partícula (v) que está cayendo verticalmente en un fluido viscoso debido a su propio peso puede calcularse igualando la fuerza de fricción con el peso aparente de la partícula del fluido de la siguiente manera:

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_o}{18n} D^2 \quad (4D)$$

Donde γ_s es el peso específico del fluido de la esfera, γ_o es el peso específico del fluido, n es la viscosidad del fluido y D es el diámetro de la esfera. Esta ley asume que todas las partículas son esferas, que al comienzo de la prueba la suspensión es uniforme u homogénea y que la concentración del agua/suelo es suficientemente baja para que las partículas no se interfieran al sedimentarse, cumpliéndose así que:

$$D = k \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (5D)$$

Siendo k un valor constante en función del peso específico y temperatura; L la profundidad efectiva y t el tiempo.

A continuación, se especifican los materiales necesarios y el procedimiento para llevar a cabo la prueba y obtener los datos

- Equipos: balanza con precisión de 0.01 g, aparato de agitación, hidrómetro (151H o 152H), Cilindro de sedimentación de vidrio de 457 mm de altura y 63.5 mm de diámetro marcado para un volumen de 1000 mL, termómetro (precisión de 1°C ó 0.5 °C), vaso de precipitado de 250 mL y dispositivo de sincronización (un reloj de pulsera o reloj con segundero)

- Procedimiento:

1. Se selecciona un tamaño de muestra de acuerdo con las siguientes condiciones: 100 a 115 g para suelos arenosos; 50 a 65 g para suelos limosos o arcillosos.
2. Agregar la muestra en defloculante y dejarlo actuar por lo menos 16 horas (Defloculante: Mezcla de agua destilada + hexametáfosfato de sodio. Este hace que las partículas estén dispersas. Para preparar la solución defloculante en la concentración correcta (4%), se agrega a un vaso de precipitado 5 g del hexametáfosfato y se completa su volumen hasta llegar a una medida de 125 ml)
3. Después de las 16 horas, llevar la muestra a un aparato de agitación, asegurándose de no perder material.
4. Se pasa la muestra a la probeta y se afora (se agrega agua destilada en la probeta hasta alcanzar los 1000 mL)
5. Tapar la probeta para hacer movimientos giratorios por 1 minuto evitando perder volumen de muestra.
6. Colocar la probeta en una superficie plana y estable para hacer lecturas del densímetro y temperatura en los siguientes tiempos (en minutos): 2, 5, 15, 30, 60, 120, 240, 250 y 1440 (se recomienda que la prueba se realice dos veces para cada muestra)
7. Se tabulan los datos (T y R) en una tabla (Ver Tabla 3D)

Tabla 3D

Tabla para datos de prueba de hidrometría.

Cantidad de muestra usada (g)			Gravedad Específica					
t (min)	T (°C)	CT	R (g/mL)	Rc (g/mL)	L (mm)	K	Diámetro (mm)	% Pasante
2								
5								
15								
30								
60								
120								
240								
250								
1440								

* *Nota.* t: tiempo; T: temperatura; CT: corrección de temperatura; R: lectura medida en el laboratorio con densímetro (g/mL); Rc: lectura corregida; L1: profundidad aparente; L: profundidad efectiva; K:

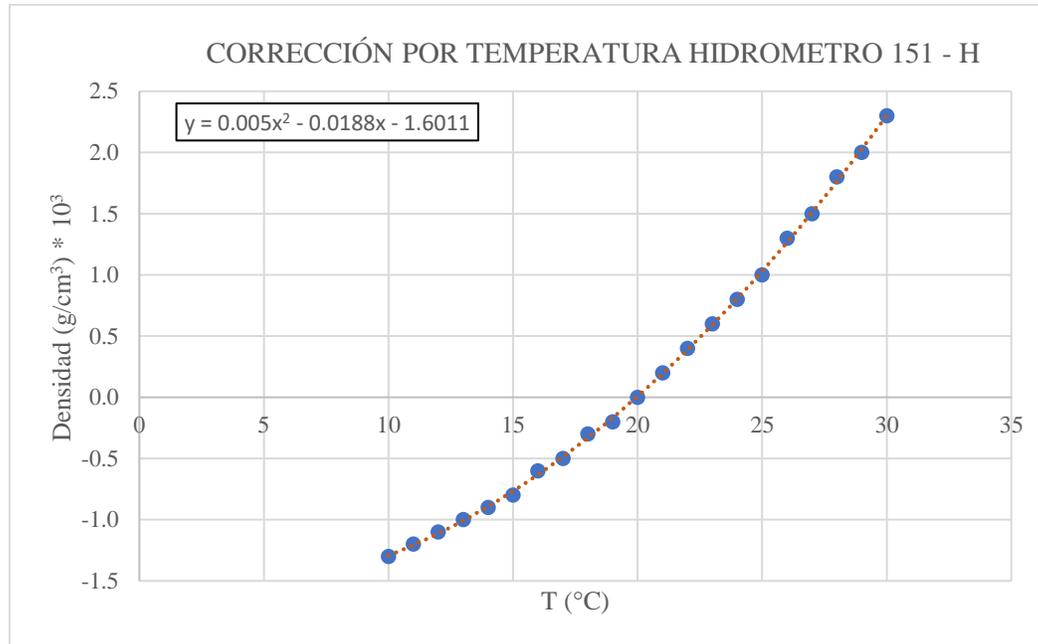
8. Para obtener un valor de lectura corregida (Rc), se hacen tres correcciones: la corrección por temperatura (CT); corrección por menisco (Cm) y corrección por defloculante (Cd).

Para calcular la CT, se grafican los datos de medidas de densidades del agua vs. temperatura (Ver Figura 1D) con el fin de obtener la fórmula de la línea a la que mejor se ajustan dichos datos. Para el caso del hidrómetro 151-H usado en la prueba, la fórmula obtenida para la corrección corresponde a:

$$CT = 0.005T^2 - 0.0188T - 1.6011 \quad (6D)$$

Figura 1D

Corrección por temperatura de hidrómetro 151-H.



Para calcular la C_m , se agrega agua destilada en una probeta de 1000 mL y se inserta el densímetro. C_m corresponderá a la diferencia entre la medida que arroja el densímetro en la parte más baja y más alta del menisco observable. Para calcular C_d , se necesita la lectura del densímetro en la probeta del 1000 mL con agua destilada y luego en agua mezclada con hexametáfosfato al 4%, donde C_d corresponderá a la diferencia de ambas medidas. Finalmente, se procede a calcular R_c , usando la Ecuación 7D:

$$R_c = R \pm CT - Cd + C_m \quad (7D)$$

9. Se procede a obtener la longitud efectiva (L) usando la Ecuación 8D:

$$L = L_1 + \frac{1}{2} \left[L_2 - \frac{V_b}{A} \right] \quad (8D)$$

Donde L_1 corresponde a la longitud que hay entre el nivel de agua corregido (Rc) y el punto 60 del densímetro; L_2 es un valor constante, medido desde el punto 60 del densímetro hasta su parte más baja; Vb es el volumen del densímetro y A es el área transversal de la probeta usada en la prueba.

10. Se procede a tabular los valores de la constante k , según la tabla Tabla 4D

Tabla 4D

Valores de k para calcular el diámetro de partículas en análisis con hidrómetro.

Temperatura (°C)	Gravedad Específica de las partículas de suelo								
	2.45	2.50	2.55	2.60	2.65	2.70	2.75	2.80	2.85
16	0.01510	0.01505	0.01481	0.01457	0.01435	0.01414	0.01394	0.01374	0.01356
17	0.01501	0.01486	0.01462	0.01439	0.01417	0.01396	0.01376	0.01356	0.01338
18	0.01492	0.01467	0.01443	0.01421	0.01399	0.01378	0.01359	0.01339	0.01321
19	0.01474	0.01449	0.01425	0.01403	0.01382	0.01361	0.01342	0.01323	0.01305
20	0.01456	0.01431	0.01408	0.01386	0.01365	0.01344	0.01325	0.01307	0.01289
21	0.01438	0.01414	0.01391	0.01369	0.01348	0.01328	0.01309	0.01291	0.01273
22	0.01421	0.01397	0.01374	0.01353	0.01332	0.01312	0.01294	0.01276	0.01258
23	0.01404	0.01381	0.01358	0.01337	0.01317	0.01297	0.01279	0.01261	0.01243
24	0.01388	0.01365	0.01342	0.01321	0.01301	0.01282	0.01264	0.01246	0.01229
25	0.01372	0.01349	0.01327	0.01306	0.01286	0.01267	0.01249	0.01232	0.01215
26	0.01357	0.01334	0.01312	0.01291	0.01272	0.01253	0.01235	0.01218	0.01201
27	0.01342	0.01319	0.01297	0.01277	0.01258	0.01239	0.01221	0.01204	0.01188
28	0.01327	0.01304	0.01283	0.01264	0.01244	0.01225	0.01208	0.01191	0.01175
29	0.01312	0.01290	0.01269	0.01249	0.01230	0.01212	0.01195	0.01178	0.01162
30	0.01298	0.01276	0.01256	0.01236	0.01217	0.01199	0.01182	0.01165	0.01149

* Nota. Unidades para $k = mm \left(\frac{min}{cm} \right)^{1/2}$

11. Se calculan los diámetros para cada tiempo usando la ecuación 5D

12. Se calcula el porcentaje pasante usando la Ecuación 9D:

$$P = \left[\left(\frac{100.000}{w} * \frac{G}{(G-1)} \right) \right] (R - 1) \quad (9D)$$

Donde w es el peso de la muestra de suelo usada y G la gravedad específica del suelo.

Una vez finalizadas las pruebas de tamizado e hidrometría, los porcentajes de tamaños de partículas se calculan de la siguiente manera:

$$\% \text{ Gravas} = 100 - \% \text{ pasante malla \#4} \quad (10D)$$

$$\% \text{ Arenas gruesas} = \% \text{ retenido en (malla \#5 + malla \#10)} \quad (11D)$$

$$\% \text{ Arenas medianas} = \% \text{ retenido en (malla \#18 + malla \#35 + malla \#40)} \quad (12D)$$

$$\% \text{ Arenas finas} = \% \text{ retenido en (malla \#60 + malla \#200)} \quad (13D)$$

$$\% \text{ Finos} = \% \text{ retenido en (malla \#60 + malla \#200)} \quad (14D)$$

$$\% \text{ Limos} = \frac{(\% \text{ pasante con diámetro } < 0.074 \text{ mm y } > 0.005 \text{ mm} - \text{arcillas}) * \% \text{ Finos}}{100} \quad (15D)$$

$$\% \text{ Arcillas} = \frac{(\% \text{ pasante con diámetro } < 0.005 \text{ mm/2}) * \% \text{ Finos}}{100} \quad (16D)$$

$$\% \text{ Coloides} = \frac{(100 - \% \text{ limos} - \% \text{ arcillas}) * \% \text{ Finos}}{100} \quad (17D)$$

Resumen de resultados por muestra

En la tabla 4D se resumen las características texturales, propiedades organolépticas y clasificación textural de las muestras de suelo adquiridos en la zona de estudio. La Figura 2D muestra la clasificación textural directa para cada muestra.

Tabla 4D

Resumen de resultados por muestra de suelo colectada en la extensión del Miembro Superior de la Formación Los Santos (K1lsms).

Muestra	COORDENADAS PLANAS MAGNA SIRGAS BOGOTA ZONE	% Gravas	% Arena			% Finos			Análisis organoléptico	Observaciones adicionales	Textura USDA
			G	M	F	Limo	Arcilla	Coloides			
MLS-SP1	N: 1'242.911 E: 1'108.633	0.00	0.00	0.39	66.87	7.30	5.22	20.22	Color 10YR 6/8. Se siente poca arena al tacto, al secarse se cuarteo en rombos de 3 - 4 cm. En la prueba de manipulación, se puede moldear un cilindro de 15 a 16 cm y se rompe al tratar de hacer un semicírculo, característica de un suelo franco.	Domina la presencia de arenas finas con una importante cantidad de finos tipo arcillas. Según los porcentajes y diámetros efectivos, coeficientes de uniformidad y curvatura, tenemos una arena mal gradada con una permeabilidad (Allen Hazen, 1982) de 3.22×10^{-7} m/s	Franco Arcillosa Arenosa
MLS-SP3	N: 1'245.470 E: 1'107.420	0.00	0.00	5.31	71.04	8.83	4.99	9.83	Color 10YR 7/8. Se siente mucha arena al tacto. Al secarse, de forma externa se forma una capa muy fina que se cuarteo en pequeños rombos de 0.5 - 1 cm. En la prueba de manipulación, no se desmorona al dejar caer, pero no se puede moldear como un cilindro de 6 - 7 cm, características de un suelo arenoso franco.	Aunque domina la presencia de arenas finas, aparece un valor considerable de arenas medianas. Según los porcentajes, diámetros efectivos, coeficientes de uniformidad y curvatura, tenemos una arena bien gradada con una permeabilidad (Allen Hazen, 1982) de 5×10^{-6} m/s	Franco Arenosa
MLS-SP4	N: 1'243.022 E: 1'109.971	12.24	2.71	1.42	56.05	8.68	9.57	9.33	Color 7.5YR 8/8. Se siente poca arena al tacto. Al secarse al horno en deshidratación se generan rombos delgados (0.6 cm de espesor) con tamaños entre 1 - 5 cm. En la prueba de manipulación, no se desmorona al dejar caer, pero no se puede moldear como un cilindro de 6 - 7 cm, características de un suelo arenoso franco.	Domina la presencia de arenas finas, sin embargo, tenemos en pequeñas cantidades arenas medianas, gruesas y un porcentaje considerable de gravas. Según los porcentajes y diámetros efectivos, Según los porcentajes, diámetros efectivos, coeficientes de uniformidad y curvatura, tenemos una arena bien gradada con una permeabilidad (Allen Hazen, 1982) de 2.67×10^{-6} cm/s	Franco Arcillosa Arenosa

Muestra	COORDENADAS PLANAS MAGNA SIRGAS BOGOTA ZONE	% Gravas	% Arena			% Finos			Análisis organoléptico	Observaciones adicionales	Textura USDA
			G	M	F	Limo	Arcilla	Coloides			
MLS-SP5	N: 1'244.524 E: 1'111.473	6.05	10.80	13.71	38.45	10.72	10.72	9.55	Color 7.5YR 4/6. Se siente un poco la arena al tacto. Al secarse al horno en deshidratación se forman huellas de desecación en una capa muy superficial. En la prueba de manipulación, no se desmorona al dejar caer, pero no se puede moldear como un cilindro de 6 - 7 cm, característico de un suelo arenoso franco.	Tenemos una textura arenosa donde predominan los granos finos, aunque tenemos un buen contenido de arenas medianas y gruesas; así mismo, contamos con un porcentaje de gravas pequeño pero significativo. Según los porcentajes y diámetros efectivos, Según los porcentajes, diámetros efectivos, coeficientes de uniformidad y curvatura, tenemos una arena mal gradada con una permeabilidad (Allen Hazen, 1982) de 2.83×10^{-5} m/s	Franco Arcillosa Arenosa
MLS-SP6	N: 1'246.233 E: 1'114.469	0.21	0.26	2.76	46.74	10.59	33.41	6.02	Color 5YR 6/8. Se siente un poco la arena al tacto. En la prueba de manipulación, permite realizar un cilindro de 6 - 7 cm, pero se rompe al tratar de hacer el cilindro de 15 cm, siendo característico de suelos franco arenosos.	Domina la presencia de arenas finas y tenemos en cantidades casi despreciable arenas medianas y gruesas, al igual que una muy mínima cantidad de gravas. Según los porcentajes y diámetros efectivos, coeficientes de uniformidad y curvatura, tenemos una arena mal gradada con una permeabilidad (Allen Hazen, 1982) de 1.54×10^{-4} m/s	Arcillosa Arenosa
MLS-SP7	N: 1'248.291 E: 1'113.135	0.22	0.15	4.97	45.03	25.94	12.97	10.73	Color 10YR 4/3. Al secarlo al horno en deshidratación, genera huellas de desecación en una superficie aproximada de 0.5 cm. En la prueba de manipulación, no se desmorona al dejar caer, pero no se puede moldear como un cilindro de 6 - 7 cm, característico de un suelo arenoso franco.	La textura está dominada por la presencia de arenas finas con cantidades mínimas de arenas medianas y muy despreciables de arenas finas y gravas. Según los porcentajes y diámetros efectivos, coeficientes de uniformidad y curvatura, tenemos una arena mal gradada con una permeabilidad (Allen Hazen, 1982) de 2.98×10^{-4} m/s	Franco Arcillosa Arenosa

Muestra	COORDENADAS PLANAS MAGNA SIRGAS BOGOTA ZONE	% Gravas	% Arena			% Finos			Análisis organoléptico	Observaciones adicionales	Textura USDA
			G	M	F	Limo	Arcilla	Coloides			
MLS-SP8	N: 1'249.855 E: 1'113.404	1.86	1.52	3.97	60.13	6.69	5.08	20.74	Color 10YR 4/3. Se siente muy arenoso al tacto. En la prueba de manipulación, no se desmorona al dejar caer, pero no se puede moldear como un cilindro de 6 - 7 cm, característico de un suelo arenoso franco.	Domina la presencia de arenas finas con una mínima cantidad de gravas y considerable cantidad de finos tipo arcilla. Según los porcentajes y diámetros efectivos, coeficientes de uniformidad y curvatura, tenemos una arena mal gradada con una permeabilidad (Allen Hazen, 1982) de 4.96×10^{-8} m/s	Franco Arcillosa Arenosa
MLS-SP9	N: 1'249.009 E: 1'108.803	0.55	0.37	5.80	58.35	9.97	17.37	7.59	Color 10YR 4/6. Se siente un poco arena fina al tacto. En la prueba de manipulación, permite realizar un cilindro de 6 - 7 cm, pero se rompe al tratar de hacer el cilindro de 15 cm, siendo característico de suelos franco arenosos.	El suelo está dominado por partículas tamaño arena muy fina, con un pequeño porcentaje de arenas medianas y una cantidad despreciable de arenas gruesas y gravas. Según los porcentajes y diámetros efectivos, coeficientes de uniformidad y curvatura, tenemos una arena mal gradada con una permeabilidad (Allen Hazen, 1982) de 1.24×10^{-5} m/s	Franco Arcillosa Arenosa
MLS-SP10	N: 1'249.695 E: 1'103.536	0.73	1.22	7.97	42.50	10.18	33.67	3.71	Color 7.5YR 5/8. Se siente la arena al tacto. En la prueba de manipulación, no se desmorona al dejar caer, pero no se puede moldear como un cilindro de 6 - 7 cm, característico de un suelo arenoso franco.	El suelo está dominado por la presencia de arenas finas, con un porcentaje menos de arenas medianas y gruesas y un porcentaje de gravas despreciable. Según los porcentajes y diámetros efectivos, coeficientes de uniformidad y curvatura, tenemos una arena mal gradada con una permeabilidad (Allen Hazen, 1982) de 8.012×10^{-5}	Arcillosa Arenosa
MLS-SP11	N: 1'250.122 E: 1'102.507	0.33	0.23	2.50	44.21	6.44	38.23	8.06	Color 5YR 5/8. Se siente arenosa al tacto. En la prueba de manipulación, permite realizar un cilindro de 6 - 7 cm, pero se rompe al tratar de hacer el cilindro de 15 cm, siendo característico de suelos franco arenosos.	Domina la presencia de arenas finas en el suelo con una menor cantidad de arenas medianas y muy despreciable cantidad de arenas gruesas y gravas de hasta 13 mm. Según los porcentajes y diámetros efectivos, coeficientes de uniformidad y curvatura, tenemos una arena mal gradada con una permeabilidad (Allen Hazen, 1982) de 2.1×10^{-4} m/s	Arcillosa Arenosa

Muestra	COORDENADAS PLANAS MAGNA SIRGAS BOGOTA ZONE	% Gravas	% Arena			% Finos			Análisis organoléptico	Observaciones adicionales	Textura USDA
			G	M	F	Limo	Arcilla	Coloides			
MLS-SP13	N: 1'250.637 E: 1'111.126	0.90	1.68	14.01	24.82	21.51	14.01	24.82	Color 10YR 5/4. Se sienten partículas de arena media al tacto. En la prueba de manipulación se desmorona un poco al dejarse caer, comportamiento característicos de suelos arenosos.	Domina la presencia partículas finas con una cantidad importante de arenas finas y en menor cantidad, arenas medianas. La cantidad de arenas gruesas y gravas es despreciable. Según los porcentajes y diámetros efectivos, coeficientes de uniformidad y curvatura, tenemos una arena mal gradada con una permeabilidad (Allen Hazen, 1982) de 2.1×10^{-3} m/s	Franco Arcillosa
MLS-SP14	N: 1'252.050 E: 1'111.744	0.48	0.36	2.35	69.95	7.15	14.52	5.18	Color 7.5YR 6/8. Se sienten partículas de arena fina al tacto. En la prueba de manipulación, no se desmorona al dejar caer, pero no se puede moldear como un cilindro de 6 - 7 cm, característico de un suelo arenoso franco.	El suelo presenta en mayor proporción arenas finas, con menor cantidad de arenas medianas y despreciable cantidad de arena gruesa y gravas. Según los porcentajes y diámetros efectivos, coeficientes de uniformidad y curvatura, tenemos una arena mal gradada con una permeabilidad (Allen Hazen, 1982) de 9.45×10^{-5} m/s	Franco Arenosa
MLS-SP15	N: 1'250.151,783 E: 1'114.619,342	0.59	1.62	7.15	41.28	17.67	15.21	16.48	Color 10YR 6/4. Se sienten partículas de arena al tacto. En la prueba de manipulación, no se desmorona al dejar caer, pero no se puede moldear como un cilindro de 6 - 7 cm, característico de un suelo arenoso franco.	Dominan la presencia de finos, seguidos por el porcentaje de arena, teniendo arenas gruesas y gravas en cantidades no muy significativas. Según los porcentajes y diámetros efectivos, coeficientes de uniformidad y curvatura, tenemos una arena mal gradada con una permeabilidad (Allen Hazen, 1982) de 1.67×10^{-4}	Franco Arcillosa Arenosa
MLS-SP16	N: 1'112.960 E: 1'252.074	1.48	2.51	4.55	48.76	14.36	17.16	11.18	Color 7.5YR 5/4. Se sienten partículas de arena al tacto. En la prueba de manipulación se desmorona al dejarse caer, comportamiento característico de suelos arenosos.	Dominan los porcentajes de arenas finas, seguidos por el porcentaje de finos, la cantidad de arena gruesa y gravas es despreciable. Según los porcentajes y diámetros efectivos, coeficientes de uniformidad y curvatura, tenemos una arena mal gradada con una permeabilidad (Allen Hazen, 1982) de 3.46×10^{-5} m/s	Franco Arcillosa Arenosa

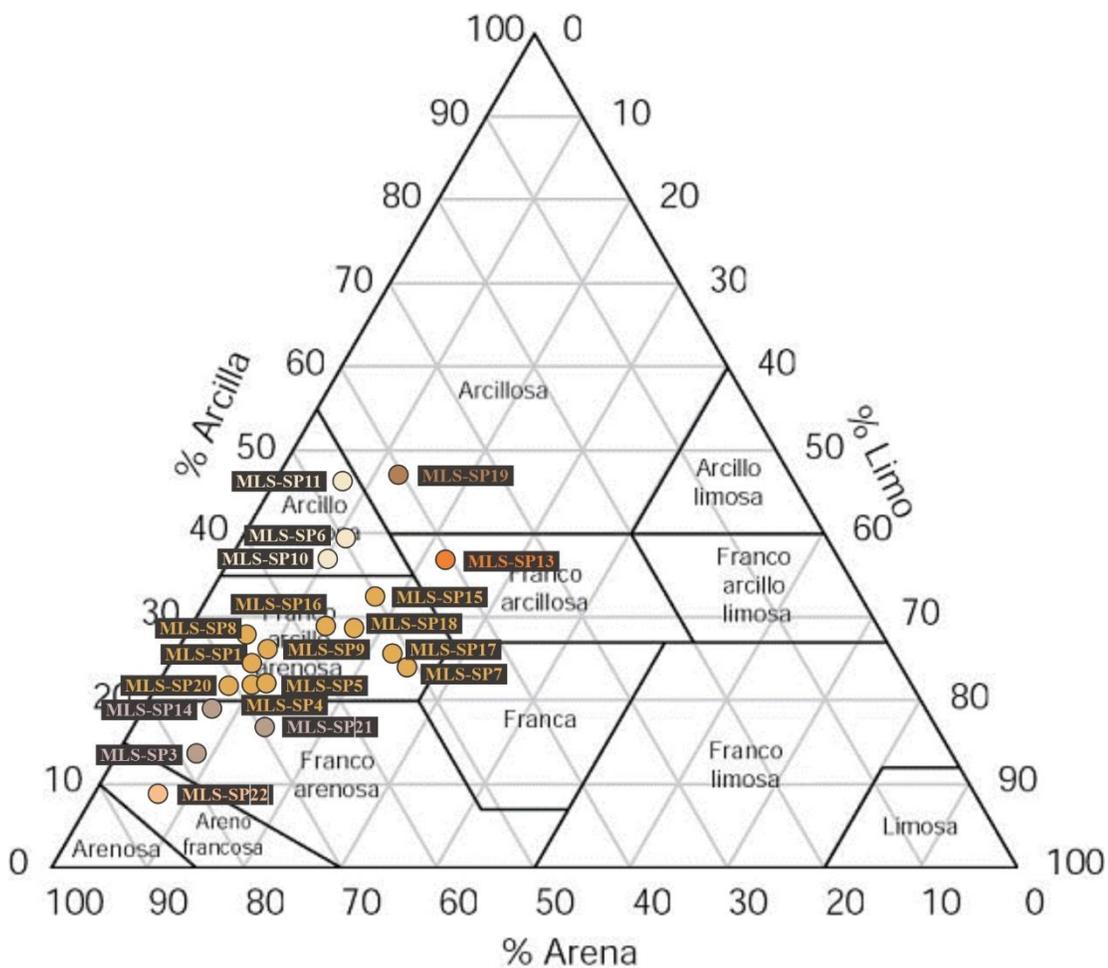
Muestra	COORDENADAS PLANAS MAGNA SIRGAS BOGOTA ZONE	% Gravas	% Arena			% Finos			Análisis organoléptico	Observaciones adicionales	Textura USDA
			G	M	F	Limo	Arcilla	Coloides			
MLS-SP17	N: 1°112.267 E: 1°252.074	9.08	5.38	4.94	36.14	20.76	15.04	8.66	Color 10YR 8/3. Se sienten partículas de arena gruesa al tacto. En la prueba de manipulación, permite realizar un cilindro de 6 - 7 cm, pero se rompe al tratar de hacer el cilindro de 15 cm, siendo característico de suelos franco arenosos.	Domina la presencia de partículas finas, seguido por las arenas finas, con poca cantidad de arenas medianas-gruesas, y con una cantidad de gravas considerable. Según los porcentajes y diámetros efectivos, coeficientes de uniformidad y curvatura, tenemos una arena mal gradada con una permeabilidad (Allen Hazen, 1982) de 1.0×10^{-4} m/s	Franco Arcillosa Arenosa
MLS-SP18	N: 1°115.637 E: 1°252.781	6.87	4.65	9.43	38.76	14.01	14.02	12.26	Color 7.5YR 7/3. Se siente poca arena al tacto. En la prueba de manipulación, se puede moldear un cilindro de 15 a 16 cm y se rompe al tratar de hacer un semicírculo, característica de un suelo franco.	Domina en el suelo las partículas finas (arcillas-limos-arenas finas), presenta un pequeño porcentaje de arenas medianas y gruesas, así como una pequeña cantidad de grava que debe ser considerada. Según los porcentajes y diámetros efectivos, coeficientes de uniformidad y curvatura, tenemos una arena mal gradada con una permeabilidad (Allen Hazen, 1982) de 8.5×10^{-5} m/s	Franco Arcillosa Arenosa
MLS-SP19	N: 1°116.233 E: 1°251.582	0.00	0.29	4.97	35.35	12.29	38.86	8.24	Color 10YR 7/6. Se siente arenoso al tacto. En la prueba de manipulación, se puede hacer un semicírculo, pero, al hacer el círculo completo, presenta ligeras grietas, comportamiento característico de material compuesto de arcilla ligera.	Domina la presencia de partículas finas tipo arcilla, acompañado por un alto contenido de arenas finas y ausencia de gravas. Según los porcentajes y diámetros efectivos, coeficientes de uniformidad y curvatura, tenemos una arena mal gradada con una permeabilidad (Allen Hazen, 1982) de 5.1×10^{-4} m/s	Arcillosa
MLS-SP20	N: 1°115.534 E: 1°255.754	0.29	0.39	1.71	67.08	8.93	4.34	17.26	Color 7.5YR 3/1. Al tacto, se siente como material muy fino. En la prueba de manipulación, no se desmorona al dejar caer, pero no se puede moldear como un cilindro de 6 - 7 cm, característico de un suelo arenoso franco.	Predomina la arena fina sin presentar una cantidad importante de arenas medianas, gruesas o gravas. Según los porcentajes y diámetros efectivos, coeficientes de uniformidad y curvatura, tenemos una arena bien gradada con una permeabilidad (Allen Hazen, 1982) de 2.3×10^{-6} m/s	Franco Arcillosa Arenosa

Muestra	COORDENADAS PLANAS MAGNA SIRGAS BOGOTA ZONE	% Gravas	% Arena			% Finos			Análisis organoléptico	Observaciones adicionales	Textura USDA
			G	M	F	Limo	Arcilla	Coloides			
MLS-SP21	N: 1'112.956 E: 1'258.628	0.00	0.15	2.14	66.75	13.53	3.84	13.59	Color 10YR 6/1. Se siente muy fino al tacto. En la prueba de manipulación, no se desmorona al dejar caer, pero no se puede moldear como un cilindro de 6 - 7 cm, característico de un suelo arenoso franco.	Domina la presencia de arenas finas con una mínima cantidad de arenas medianas y ausencia de gravas. Según los porcentajes y diámetros efectivos, coeficientes de uniformidad y curvatura, tenemos una arena bien gradada con una permeabilidad (Allen Hazen, 1982) de 7.26×10^{-7} m/s	Franco Arenosa
MLS-SP22	N: 1'110.048 E: 1'259.166	0.58	0.89	7.87	74.32	7.37	2.28	6.70	Color 10YR 6/2. Se sienten partículas de arena fina al tacto. En la prueba de manipulación se desmorona al dejarse caer en forma de bolita desde una altura considerable, comportamiento característico de suelos arenosos.	Es dominante la cantidad de granos tamaño arena fina en el suelo, con una menor cantidad de arenas medianas y muy despreciable cantidad de arenas gruesas y gravas. Según los porcentajes y diámetros efectivos, coeficientes de uniformidad y curvatura, tenemos una arena mal gradada con una permeabilidad (Allen Hazen, 1982) de 2.67×10^{-5} m/s	Arenosa Franca

* Nota. G: gruesa; M: media; F: fina. Los colores descritos son los propuestos en el sistema Munsell.

Figura 2D

Textura de los suelos del Miembro Superior de la Formación Los Santos (K1lsms).



Anexo E*Descripción y análisis de perforaciones en la extensión del Miembro Superior de la Formación Los Santos (K₁lsms).*

En este apartado se muestran las descripciones litológicas reportadas por 15 pozos perforados en la zona de estudio, 1 de ellos perteneciente al inventario actualizado (P4) y 14 ofrecidos por los puntos de concesión de la CAS (PC1, PC5, PC9, PC16, PC22, PC25, PC27, PC28, PC31, PC33, PC34, PC35, PC37 y PC38)

Tabla 1E*Descripción y análisis de perforación reportada en el P4, Mesa de Los Santos, Santander.*

P4			
<i>Localización: 1252923.728 N; 1113961.631 E; Altura 1677.781 m.s.n.m</i>			
<i>Profundidad (m)</i>	<i>Observación de núcleos</i>	<i>Interpretación en sondeo eléctrico</i>	<i>Unidad asociada</i>
0 - 4.70	Suelo, areniscas de grano fino con arcillositas bien meteorizadas friables.	N.A.	Suelo residual del Miembro Superior de la Formación los Santos (K ₁ lsms)
4.7 - 5.2	Areniscas de cuarzo de grano fino y medio con cemento arcilloso, con moscovita, de color blanco amarillento, oxidación diferencial.	N.A.	Roca completamente meteorizada del Miembro Superior de la Formación los Santos (K ₁ lsms) ligeramente meteorizado
5.2 - 7.75	Areniscas de cuarzo de grano fino y medio con cemento arcilloso, con moscovita de color blanco amarillento. Roca muy meteorizada.	N.A.	Rocas altamente meteorizadas del Miembro Superior de la Formación los Santos (K ₁ lsms)
7.75 - 10.80	Areniscas de cuarzo de grano fino y medio con cemento arcilloso compacto, con moscovita, capas de yeso de color blanco perla, oxidación diferencial, roca muy meteorizada.	N.A.	
10.80 - 16.90	Roca meteorizada. Arenisca. Arcillolita gris verdosa intercalada con areniscas finas de color pardo. Areniscas de cuarzo de grano fino y medio con cemento arcilloso, con moscovita, de color blanco grisáceo.	N.A.	Rocas moderadamente meteorizadas del Miembro Superior de la Formación los Santos (K ₁ lsms)
16.90 - 19.95	Areniscas de cuarzo de grano fino y medio con cemento arcilloso, con moscovita, de color blanco grisáceo, fracturada, oxidación diferencial, estratificación plano-paralela, capas de yeso compactas. Estratos buzando aproximadamente 10°. Se observa fracturas verticales y diagonales ligeramente oxidadas rellenas de arcilla, con señales de flujo de agua. Acuífero.	N.A.	Rocas ligeramente meteorizadas del Miembro Superior de la Formación los Santos (K ₁ lsms)

<i>Profundidad (m)</i>	<i>Observación de núcleos</i>	<i>Interpretación en sondeo eléctrico</i>	<i>Unidad asociada</i>
19.95 - 23	Areniscas rojas muy finas con lúticos de arcillolita café.	N.A.	Roca fresca del Miembro Superior de la Formación los Santos (K ₁ lsms)
23 - 29.10	Areniscas de cuarzo de grano fino y medio a grueso, haciéndose más grueso hacia la base, con cemento arcilloso, con moscovita de color blanco grisáceo, pardo rojizo, oxidación diferencial, estratificación plano-paralela. Se observan fracturas verticales y diagonales ligeramente oxidadas rellenas de arcilla con señales de flujo de agua. Acuífero.	N.A.	
29.10 - 34.50	Rocas de la Formación Tambor. Formación arenisca gruesa. Porosidad primaria de unos 20 cm.	N.A.	
34.50 - 41.30	Formación Tambor consolidada.	N.A.	
41.30 - 44.35	Roca arcillosa grisácea con fracturaciones diagonales.	N.A.	
44.35 - 53.50	Roca arcillosa grisácea con fracturaciones diagonales.	N.A.	
53.50 - 61.3	Arenisca de grano medio fracturado saturado de arcilla con moscovita de color blanco grisáceo.	N.A.	

* *Nota.* P4: pozo 4; m.s.n.m: metros sobre el nivel del mar; N.A.: no aplica; K₁lsms: Miembro Superior de la Formación los Santos.

Tabla 2E

Descripción y análisis de perforación reportada en el PC1.

PC1			
<i>Localización: 1249746 N; 1113692 E; Altura 1699 m.s.n.m</i>			
<i>Profundidad (m)</i>	<i>Observación de ripios</i>	<i>Interpretación en sondeo eléctrico</i>	<i>Unidad asociada</i>
1	Capa vegetal	Suelo residual arenoso	Suelo residual del Miembro Superior de la Formación Los Santos (K ₁ lsms)
2 - 6	Arcilla	Areniscas cuarzo-feldespáticas, meteorizadas e intercaladas con niveles de arcillolitas meteorizado	Miembro Superior de la Formación Los Santos (K ₁ lsms) ligeramente meteorizado
7 - 12	Roca	Areniscas cuarzo-feldespáticas, meteorizadas e intercaladas con niveles de arcillolitas meteorizado con cierto grado de humedad.	Miembro superior de la Formación Los Santos (K ₁ lsms)
13	Roca fracturada		
14 - 17	Roca		
18	Roca fracturada		
19 - 26	Roca	Areniscas cuarzosas fracturadas con cierto grado de humedad.	
27	Roca fracturada (Fractura de 50 cm)		
28 - 35	Roca		
36	Roca fracturada	Arenisca fracturada cuarzo-feldespática con cierto grado de humedad	
37 - 40	Roca		

* *Nota.* PC1: punto de concesión 1; m.s.n.m: metros sobre el nivel del mar; K₁lsms: Miembro Superior de la Formación Los Santos

Tabla 3E

Descripción y análisis de perforación reportada en el PC5, Mesa de Los Santos, Santander.

PC5			
<i>Localización: 1247006 N; 1113748 E; Altura 1730 m.s.n.m</i>			
<i>Profundidad (m)</i>	<i>Observación de núcleos</i>	<i>Interpretación en sondeo eléctrico</i>	<i>Unidad asociada</i>
0 - 5	Suelo areno - arcilloso de color marrón amarillento.	0.5 m de suelo areno-arcilloso con materia orgánica seguido de arenisca arcillosa altamente meteorizadas, húmedas a la base.	Suelo residual del Miembro Superior de la Formación Los Santos (K ₁ lsms)
5 - 14	Arenisca gris clara; grano fino a muy fino, consolidada, muy fracturada, las fracturas tienen una tonalidad amarillenta debido a la presencia de material arcilloso amarillento.	Areniscas cuarzo-feldespáticas, fracturadas intercaladas con niveles de arcillolitas. Nivel húmedo.	Miembro Superior de la Formación Los Santos (K ₁ lsms)
14 - 17.5	Limolita rojiza moderadamente firme; ligeramente arenosa, moderadamente arenosa; moderadamente consolidada, muy fracturada; con pequeñas incrustaciones de material arenoso color gris claro, de grano fino a muy fino.		
17.5 - 19.5	Arenisca gris medio a gris claro, menor gris amarillento; grano fino a muy fino, consolidada, fracturada; ocasionalmente las fracturas están rellenas de arcilla marrón amarillento.	Areniscas fracturadas cuarzo-feldespáticas.	
19.5 - 23.5	Arenisca de color rojo claro, grano fino, consolidada, ligeramente fracturada, en la parte superior muy fracturada.		
23.5 - 63.5	Arenisca gris claro menor gris medio, ocasional gris amarillento; predomina grano medio, menor grano fino, local grano grueso (conglomerático); consolidada, en partes muy fracturada, algunas fracturas se encuentran rellenas de material arcilloso amarillo, algo plástico, intercalada con algunos bandeamientos de material limoso color rojizo debido a la presencia de óxidos de hierro.		
63.5 - 67.5	Arenisca gris verdoso, menor gris claro; grano medio, menor grano fino ocasional grano grueso; consolidada, poco fracturada.		Miembro Medio de la Formación Los Santos (K ₁ lsmm)

<i>Profundidad (m)</i>	<i>Observación de núcleos</i>	<i>Interpretación en sondeo eléctrico</i>	<i>Unidad asociada</i>
67.5 - 79.5	Arenisca gris claro, menor gris rojizo; grano fino, menor grano medio; consolidada, moderadamente fracturada; con bandeamiento color rojizo debido a limolitas color rojizo y oxidaciones de hierro.		
79.5 - 84	Arenisca gris medio, menor gris verdoso, ocasional gris claro; grano medio a fino; consolidada, fracturamiento moderado, las fracturas rellenas de materia orgánica.	Areniscas fracturadas cuarzo-feldespáticas, nivel húmedo.	Miembro Inferior de la Formación Los Santos (K ₁ lsmi)
84 - 90	Arenisca gris - rojizo, menor gris claro; grano medio a fino, en partes arenisca conglomerática; consolidada; fracturamiento moderado; con intercalaciones de limolitas rojizas, ferruginosas; se nota en partes estratificación paralela		

* *Nota.* PC5: punto de concesión 5; m.s.n.m: metros sobre el nivel del mar; K₁lsmi: Miembro Superior de la Formación Los Santos; K₁lsmm: Miembro Medio de la Formación Los Santos; K₁lsmi: Miembro Inferior de la Formación Los Santos.

Tabla 4E

Descripción y análisis de perforación reportada en el PC9, Mesa de Los Santos, Santander.

PC9			
<i>Localización: 1250323 N; 1114365 E; Altura 1634 m.s.n.m</i>			
<i>Profundidad (m)</i>	<i>Observación de ripios</i>	<i>Interpretación en sondeo eléctrico</i>	<i>Unidad asociada</i>
1	Capa vegetal	Suelo húmedo	Suelo residual del Miembro Superior de la Formación Los Santos (K ₁ lsms)
2 - 4	Arena	Areniscas saturadas	Formación Los Santos (K ₁ ls)
5	Arena y arcilla		
6 - 7	Arcilla		
8 - 16	Roca		
17	Roca (fractura)		
18 - 19	Roca		
20 - 21	Roca (fractura)	Areniscas secas	
22	Roca		
23 - 25	Roca (fractura)		
26 - 27	Roca		
28 - 37	Roca (fractura)		
38	Roca		
39	Roca (fractura 1m)		
40	Roca		
41	Roca (fractura)		
42 - 49	Roca		
50	Roca (fractura)		
51 - 61	Roca		
62 - 73	Roca (fractura)		
74	Roca		
75	Roca (fractura)	Areniscas saturadas	
76 - 77	Roca		
78	Roca (fractura)		
79	Roca		
80	Roca (fractura)		
81 - 84	Roca		
85	Roca (fractura)		
86 - 90	Roca		

* *Nota.* PC9: punto de concesión 9; m.s.n.m: metros sobre el nivel del mar; K₁ls: Formación Los Santos; K₁lsmm

Tabla 5E

Descripción y análisis de perforación reportada en el PC16, Mesa de Los Santos, Santander.

PC16			
<i>Localización: 1246580 N; 1111414 E</i>			
Profundidad (m)	Observación de núcleos	Interpretación en sondeo eléctrico	Unidad asociada
0 - 6.5	Suelo areno - arcilloso de color marrón oscuro	N.A.	Suelo residual del Miembro Superior de la Formación los Santos (K ₁ lsms)
6.6 - 12.5	Arenisca gris - amarillenta en el tope, gris claro a gris medio; a la base se notan bandeamientos rojizos; grano medio a fino, consolidada, fracturada; las fracturas están rellenas de arcilla marrón amarillento, ocasionalmente gris verdoso	N.A.	Miembro Superior de la Formación los Santos (K ₁ lsms)
12.6 - 23	Arenisca gris claro con bandeamientos rojizos, menor gris amarillento, grano fino a muy fino, consolidada, muy fracturada; se notan algunos niveles arcillosos color verde amarillento; en la base se nota un gris rojizo claro y menos fracturas	N.A.	
24 - 30.5	Arenisca gris claro menor gris medio, grano fino a muy fino, muy consolidada, fracturada, algunas fracturas rellenas de materia orgánica; en la base se nota un bandeamiento intenso rojizo	N.A.	
30.6 - 41	Arenisca gris verdoso a gris claro, grano fino a medio, al tope se nota una presencia de materia orgánica, consolidada, moderadamente fracturada, se nota un bandeamiento rojizo	N.A.	
41.1 - 48	Arenisca gris rojiza debido a bandeamientos de material limoso color rojizo en el tope y en la base, a la parte media, se presenta una arenisca color gris medio a gris claro; predomina el grano medio, menor grano fino; consolidada, moderadamente fracturada, las fracturas presentan oxidación y presentan una coloración amarillenta	N.A.	Miembro Medio de la Formación los Santos (K ₁ lsmm)
49 - 57.5	Arenisca color gris claro, menor gris amarillento; grano medio, menor grano fino; moderadamente consolidada, muy fracturada, algunas fracturas se ven rellenas de materia orgánica y otras de material arcilloso amarillento; en la base se nota presencia de bandeamiento rojizo debido a la oxidación	N.A.	
57.6 - 59	Arenisca color gris verdoso moderado; grano fino a muy fino; consolidado, muy poco fracturado	N.A.	
59.1 - 71	Arenisca gris rojizo, menor gris claro, en partes con tonalidades verdosas; grano medio, menor grano fino; moderadamente consolidada, fracturada; ocasionalmente con	N.A.	Miembro Inferior de la Formación los Santos (K ₁ lsmi)

<i>Profundidad (m)</i>	<i>Observación de núcleos</i>	<i>Interpretación en sondeo eléctrico</i>	<i>Unidad asociada</i>
	algunos niveles de arenisca color amarillento, grano medio, moderadamente consolidada; ligeramente fracturada		
71.1 - 74	Limolita rojiza ferruginosa; moderadamente firme; con inclusiones y niveles arenosos color gris claro a gris verdoso, de grano muy fino; en la parte superior se observa un nivel arenoso color gris claro a gris amarillento, grano medio menor grano grueso; moderadamente consolidada; y material arcilloso color amarillento	N.A.	
74.1 - 82	Arenisca gris verdoso, menor gris claro; grano medio a fino; consolidada; moderadamente fracturada; en la base se notan intercalaciones de limolitas rojizas, ferruginosas con areniscas de color gris verdoso claro, grano medio	N.A.	

* *Nota.* PC16: punto de concesión 169; m.s.n.m: metros sobre el nivel del mar; N.A.: no aplica;
K₁lsms: Miembro Superior de la Formación los Santos; K₁lsmm: Miembro Medio de la Formación
los Santos; K₁lsmi: Miembro Inferior de la Formación los Santos.

Tabla 6E

Descripción y análisis de perforación reportada en el PC22, Mesa de Los Santos, Santander.

PC22			
<i>Localización: 1248537 N; 11130395 E; Altura 1717 m.s.n.m</i>			
<i>Profundidad (m)</i>	<i>Observación de núcleos</i>	<i>Interpretación en sondeo eléctrico</i>	<i>Unidad asociada</i>
0 - 4	Suelo	N.A.	Suelo residual del Miembro Superior de la Formación Los Santos (K ₁ lsms)
4 - 5.3	Arcillolita violeta clara	N.A.	Miembro Superior de la Formación los Santos (K ₁ lsms)
5.3 - 26.1	Arenisca de cuarzo de grano fino y medio cementadas, de color blanco, localmente con líticos de limolitas con diámetros de 1 a 5 cm. Se observa laminación plano-paralela. Fracturas perpendiculares y diagonales con señales de flujo de agua	N.A.	Formación los Santos (K ₁ lsms)
26.1 - 28.25	Intercalaciones de arcillolitas violetas con areniscas de cuarzo de granos muy finos	N.A.	Miembro Medio de la Formación los Santos (K ₁ lsmm)
28.25 - 34.55	Areniscas de cuarzo de grano medio, cementados con moscovita, de color blanco. Fracturas diagonales con señales de flujo de agua	N.A.	
34.55 - 37.9	Limolita parda cementada. Estratos buzando aproximadamente a 10°	N.A.	
37.9 - 42.7	Arenisca de cuarzo de grano fino y medio cementadas, de color blanco. Se observa laminación plano-paralela	N.A.	
42.7 - 44.8	Limolita arcillosa de color pardo	N.A.	
44.8 - 79.7	Arenisca de grano medio y fino, cementada de color blanco, con algo de moscovita, estratificación plano-paralela. Presenta fracturas perpendiculares y diagonales con señales de flujo de agua	N.A.	Miembro Inferior de la Formación los Santos (K ₁ lsmi)
79.7 - 89.7	Arenisca de cuarzo de grano fino y medio, cementada, de color blanco grisáceo y pardo, con algo de muscovita. Estratificación plano-paralela. Con leves señales de flujo.	N.A.	
89.7 - 90.5	Arenisca de cuarzo de grano medio y grueso, cementada de color rojizo, perteneciente al techo de la Fm. Girón	N.A.	

* *Nota.* PC22: punto de concesión 22; m.s.n.m: metros sobre el nivel del mar; N.A.: no aplica; K₁lsms: Miembro Superior de la Formación los Santos; K₁lsmm: Miembro Medio de la Formación los Santos; K₁lsmi: Miembro Inferior de la Formación los Santos.

Tabla 7E

Descripción y análisis de perforación reportada en el PC25, Mesa de Los Santos, Santander.

PC25			
<i>Localización: 1111106 N; 1244860 E; Altura 1632 m.s.n.m</i>			
<i>Profundidad (m)</i>	<i>Observación de ripios</i>	<i>Interpretación en sondeo eléctrico</i>	<i>Unidad asociada</i>
0 - 1	Suelo residual constituido por arenas, limos y materia orgánica, color gris	Suelo arenoso	Suelo residual del Miembro Superior de la Formación los Santos (K ₁ lsms)
2 - 3	Basamento Cretácico compuesto por areniscas de grano finas muy meteorizadas, color ocre	Areniscas cuarzo-feldespáticas, fracturadas y muy meteorizadas	Miembro Superior de la Formación los Santos (K ₁ lsms)
3 - 4	Basamento Cretácico compuesto por areniscas de grano fino con partículas redondeadas, bien calibradas de color café a naranja	Areniscas cuarzo-feldespáticas, fracturadas muy meteorizadas e intercaladas con niveles de arcillolitas	
5 - 10	Basamento Cretácico compuesto por areniscas de grano fino meteorizadas con partículas redondeadas, bien calibradas de color café a naranja	Areniscas fracturadas cuarzo-feldespáticas. Húmedas.	
11 - 14	Basamento Cretácico y compuesto por areniscas de grano fino con partículas redondeadas, bien calibradas de color ocre		
15 - 16	Basamento Cretácico y compuesto por areniscas de grano fino con partículas redondeadas, bien calibradas de color crema		
17 - 20	Basamento Cretácico y compuesto por areniscas de grano grueso con partículas redondeadas, bien calibradas de color parda		
21 - 27	Basamento Cretácico y compuesto por areniscas de grano medio con partículas redondeadas, bien calibradas de color crema		
28 - 29	Basamento Cretácico y compuesto por areniscas cuarzosas de grano grueso con partículas redondeadas, bien calibradas de color crema		
30 - 47	Basamento Cretácico y compuesto por areniscas cuarzo-feldespáticas de grano fino con partículas redondeadas, bien calibradas de color crema		Miembro Medio de la Formación los Santos (K ₁ lsmm)

<i>Profundidad (m)</i>	<i>Observación de ripios</i>	<i>Interpretación en sondeo eléctrico</i>	<i>Unidad asociada</i>
48 - 54	Basamento Cretácico y compuesto por areniscas arcillosas cuarzofeldespáticas de grano medio con partículas redondeadas, bien calibradas de color gris	Areniscas fracturadas cuarzosas. Húmedas.	
54 - 56	Basamento Cretácico y compuesto por areniscas cuarzosas de grano muy grueso con partículas redondeadas, bien calibradas de color gris		Miembro Inferior de la Formación los Santos (K ₁ lsmi)
57 - 62	Basamento Cretácico y compuesto por areniscas cuarzosas de grano muy grueso con partículas redondeadas, bien calibradas de color crema		
63 - 65	Basamento Cretácico y compuesto por areniscas conglomeráticas cuarzosas de grano muy grueso con partículas redondeadas, bien calibradas de color gris		
66 - 70	Basamento Cretácico y compuesto por areniscas cuarzosas de grano muy grueso con partículas redondeadas, bien calibradas de color gris		
71 - 81	Basamento Jurásico y compuesto por areniscas arcillosas de grano muy grueso con partículas redondeadas, bien calibradas de color violeta		

* *Nota.* PC25: punto de concesión 25; m.s.n.m: metros sobre el nivel del mar; K₁lsm: Miembro Superior de la Formación los Santos; K₁lsmm: Miembro Medio de la Formación los Santos; K₁lsmi: Miembro Inferior de la Formación los Santos.

Tabla 8E

Descripción y análisis de perforación reportada en el PC27, Mesa de Los Santos, Santander.

PC27			
<i>Localización: 1250460 N; 1112930 E; Altura 1679 m.s.n.m</i>			
<i>Profundidad (m)</i>	<i>Observación de ripios</i>	<i>Interpretación en sondeo eléctrico</i>	<i>Unidad asociada</i>
0 - 0.5	Suelo arenoso y materia orgánica	0.3 m de suelo arenoso y materia orgánica seguidos por areniscas cuarzo-feldespáticas, fracturadas y muy meteorizadas.	Suelo residual del Miembro Superior de la Formación los Santos (K ₁ lsms)
0.5 - 10	Areniscas cuarzo-feldespáticas muy meteorizadas.	Areniscas cuarzo-feldespáticas, fracturadas y meteorizadas.	Miembro Superior de la Formación los Santos (K ₁ lsms)
10 - 17	Areniscas cuarzo-feldespáticas, húmedo a la base.	Húmedas a la base.	
17 - 30	Areniscas cuarzo-feldespáticas, húmedo	Areniscas cuarzo-feldespáticas, fracturadas, Húmedo.	
30 - 50	Areniscas de grano medio cuarzo-feldespáticas, con fracturas asociadas. Ligeramente húmedo.	Areniscas de grano medio cuarzo-feldespáticas, con fracturas asociadas. Ligeramente húmedo.	

* *Nota.* PC27: punto de concesión 27; m.s.n.m: metros sobre el nivel del mar; K₁lsms: Miembro Superior de la Formación los Santos; K₁lsmm: Miembro Medio de la Formación los Santos; K₁lsmi: Miembro Inferior de la Formación los Santos.

Tabla 9E

Descripción y análisis de perforación reportada en el PC28, Mesa de Los Santos, Santander.

PC28			
<i>Localización: 1245756 N; 1111993 E; Altura 1648 m.s.n.m</i>			
<i>Profundidad (m)</i>	<i>Observación de ripios</i>	<i>Interpretación en sondeo eléctrico</i>	<i>Unidad asociada</i>
0 - 2	Material arcilloso de color negro con materia orgánica	0.3 m de suelo areno-arcilloso, húmedo, seguido de arcillolitas meteorizadas y húmedas	Miembro Superior de la Formación los Santos (K ₁ lsms)
2 - 10	Areniscas cuarzofeldespáticas de color blanco crema	Areniscas meteorizadas y secas	
10 - 10.2	Arcillolita de color rojo	Areniscas fracturadas cuarzofeldespáticas intercaladas con niveles de arcillolitas. Nivel húmedo	
10.2 - 12	Areniscas arcillosas de color violeta		
12 - 18	Areniscas de grano fino cuarzofeldespáticas, de color crema		
18 - 28	Areniscas de grano fino cuarzofeldespáticas, de color violeta		
28 - 30	Areniscas de grano fino cuarzofeldespáticas, de color crema		
30 - 45	Areniscas de grano medio arcillosas, de color rojo a violeta	Areniscas fracturadas cuarzofeldespáticas. Húmedas	Miembro Medio de la Formación los Santos (K ₁ lsmm)
45 - 48	Areniscas de grano medio cuarzofeldespáticas de color crema		
48 - 66	Areniscas de grano medio, color violeta		
66 - 69	Areniscas deleznales de color violeta		
69 - 71	Areniscas de grano medio conglomeráticas de color violeta		Miembro Inferior de la Formación los Santos (K ₁ lsmi)
71 - 85	Areniscas de grano medio, color violeta		

* *Nota.* PC28: punto de concesión 28; m.s.n.m: metros sobre el nivel del mar; K₁lsms: Miembro Superior de la Formación los Santos; K₁lsmm: Miembro Medio de la Formación los Santos; K₁lsmi: Miembro Inferior de la Formación los Santos.

Tabla 10E

Descripción y análisis de perforación reportada en el PC31, Mesa de Los Santos, Santander.

PC31			
<i>Localización: 1241987 N; 1108467 E; Altura 1587 m.s.n.m</i>			
<i>Profundidad (m)</i>	<i>Observación de ripios</i>	<i>Interpretación en sondeo eléctrico</i>	<i>Unidad asociada</i>
0 - 3	Capa vegetal, arcilla con piedra	Suelo residual arenoso con materia orgánica	Suelo residual del miembro superior de la Formación los Santos (K ₁ lsms)
4 - 21	Roca arenosa	3.2 m de areniscas cuarzo-feldespáticas, fracturadas, muy meteorizadas e intercaladas con niveles de arcillolitas 4.2 m de areniscas cuarzo-feldespáticas, fracturadas, meteorizadas e intercaladas con niveles de arcillolitas. Húmedo a la base. 2.8 m de areniscas cuarzosas fracturadas y húmedas 6.8 m de areniscas fracturadas cuarzo-feldespáticas. Ligeramente húmedo	Miembro Superior de la Formación los Santos (K ₁ lsms)
22 - 23	Roca arenosa solida (fracturada)	Areniscas fracturadas cuarzo-feldespáticas. Ligeramente húmedo	Miembro Medio de la Formación los Santos (K ₁ lsmm)
24 - 29	Roca solida		
30	Roca sólida (fracturada)		
31 - 42	Roca sólida		
43 - 44	Roca sólida (fracturada)		
45 - 46	Roca sólida		
47 - 49	Roca sólida dura		
50 - 58	Roca sólida		
59	Roca sólida (fracturada)		
60	Roca sólida		
61 - 63	Roca sólida (fracturada)	Areniscas fracturadas cuarzo-feldespáticas. Húmedo.	Miembro Inferior de la Formación los Santos (K ₁ lsmi)
64 - 74	Roca Roja		
75	Roca Roja (fracturada)		
76 - 84	Roca Roja		
85	Roca Roja (fracturada)		
86 - 90	Roca Roja		

* *Nota.* PC31: punto de concesión 31; m.s.n.m: metros sobre el nivel del mar; K₁lsms: Miembro Superior de la Formación los Santos; K₁lsmm: Miembro Medio de la Formación los Santos; K₁lsmi: Miembro Inferior de la Formación los Santos.

Tabla 11E

Descripción y análisis de perforación reportada en el PC33, Mesa de Los Santos, Santander.

PC33				
<i>Localización: 1247907 N; 1112409 E; Altura 1711 m.s.n.m</i>				
<i>Profundidad (m)</i>	<i>Observación de ripios</i>	<i>Interpretación en sondeo eléctrico</i>	<i>Unidad asociada</i>	
0 - 2	Material areno-arcilloso de color negro con materia orgánica	NA	Suelo derivado de meteorización del Miembro Superior de la Formación los Santos (K ₁ lsms)	
2 - 10	Arenisca cuarzo-feldespática de color blanco crema	NA	Miembro Superior de la Formación los Santos (K ₁ lsms)	
10 - 10.2	Arcillolita de color rojo	NA		
10.2 - 12	Areniscas arcillosas de color violeta	NA		
12 - 18	Areniscas de grano fino cuarzofeldespáticas, de color crema	NA		
18 - 28	Areniscas de grano medio cuarzofeldespáticas, color violeta	NA	Miembro Medio de la Formación los Santos (K ₁ lsmm)	
28 - 30	Areniscas de grano fino cuarzofeldespáticas, de color crema	NA		
30 - 45	Areniscas de grano medio arcillosas, de color rojo a violeta	NA		
45 - 48	Areniscas de grano medio cuarzofeldespáticas de color crema	NA		
48 - 66	Areniscas de grano medio, color violeta	NA		
66 - 69	Areniscas deleznales de color violeta	NA		
69 - 70	Areniscas de grano medio conglomeráticos de color violeta	NA		
70 - 82	Areniscas de grano medio, color violeta	NA		
				Miembro Inferior de la Formación los Santos (K ₁ lsmi)

* *Nota.* PC33: punto de concesión 33; m.s.n.m: metros sobre el nivel del mar; K₁lsms: Miembro Superior de la Formación los Santos; K₁lsmm: Miembro Medio de la Formación los Santos; K₁lsmi: Miembro Inferior de la Formación los Santos.

Tabla 12E

Descripción y análisis de perforación reportada en el PC34, Mesa de Los Santos, Santander.

PC34			
<i>Localización: 1251051 N; 1112031 E; Altura 1660 m.s.n.m</i>			
<i>Profundidad (m)</i>	<i>Observación de ripios</i>	<i>Interpretación en sondeo eléctrico</i>	<i>Unidad asociada</i>
0 - 2	Material areno-arcilloso de color negro con materia orgánica	NA	Suelo residual del Miembro Superior de la Formación Los Santos (K ₁ lsms)
2 - 10	Areniscas cuarzo-feldespáticas de color blanco crema	NA	Formación Los Santos (K ₁ ls)
10 - 10.2	Arcillolitas de color rojo	NA	
10.2 - 12	Areniscas arcillosas de color violeta	NA	
12 - 18	Areniscas de grano fino cuarzo-feldespáticas, de color crema	NA	
18 - 28	Areniscas de grano medio cuarzo-feldespáticas, color violeta	NA	
28 - 30	Areniscas de grano fino cuarzo-feldespáticas, de color crema	NA	
30 - 45	Areniscas de grano medio arcillosas de color rojo a violeta	NA	
45 - 80	Areniscas de grano medio cuarzo-feldespáticas, de color rojo a violeta	NA	

* *Nota.* PC34: punto de concesión 34; m.s.n.m: metros sobre el nivel del mar; K₁ls: Formación los Santos.

Tabla 13E

Descripción y análisis de perforación reportada en el PC35, Mesa de Los Santos, Santander.

PC35			
<i>Localización: 1245878 N; 1112526 E</i>			
<i>Profundidad (m)</i>	<i>Observación de ripios</i>	<i>Interpretación en sondeo eléctrico</i>	<i>Unidad asociada</i>
0 - 4	Segmento limoso arcilloso color naranja ligeramente meteorizado con ligeras impregnaciones de óxidos de hierro	N.A.	Miembro Superior de la Formación los Santos (K1sms)
4 - 7.5	Intercalaciones de limolitas color gris y lodolitas color gris oscuro bandeadas, ocasionales impregnaciones de óxidos de hierro	N.A.	
7.5 - 31	Paquete compacto de areniscas cuarzosas de grano medio a fino color gris claro, con frecuente fracturamiento abierto, relleno de óxidos de hierro y ocasionales niveles de hasta 10 cm de lodolita color gris oscuro	N.A.	
31 - 32.5	Intervalo compuesto por intercalaciones de lodolita color gris y arenisca cuarzosa gris claro con impregnaciones de óxidos de hierro. Frecuentes fracturas y un nivel de 30 cm de material brechado	N.A.	Miembro Medio de la Formación los Santos (K1smm)
32.5 - 38.5	Arenisca cuarzosa compacta color gris claro ocasionales impregnaciones de óxidos de hierro	N.A.	
38.5 - 41.5	Intercalaciones de areniscas cuarzosas de grano medio color gris claro con frecuentes bandeamientos de lodolita color marrón claro con frecuentes impregnaciones de óxidos de hierro	N.A.	
41.5 - 57.5	Intercalaciones de arenisca cuarzosa de grano medio, color gris claro con frecuentes bandeamientos de lodolita color marrón claro con frecuentes impregnaciones de óxidos de hierro	N.A.	
57.5 - 59.5	Intercalación de areniscas cuarzosas color gris claro y niveles de limolita color naranja con fuertes impregnaciones de óxidos de hierro	N.A.	
59.5 - 62	Intercalaciones de areniscas cuarzosas color gris claro y lentejones amorfos de areniscas color rojizo con ocasionales impregnaciones de óxidos de hierro	N.A.	
62 - 68.5	Arenisca cuarzosa color gris claro con frecuentes laminaciones de arenisca lodosa de tonalidades rojizas	N.A.	
68.5 - 71	Areniscas rojizas con ocasionales lentejones amorfos de arenisca cuarzosa color gris claro	N.A.	
71 - 74	Arenisca color gris claro con frecuentes fragmentos amorfos de arenisca de grano fino de tonalidades rojizas, ocasionales impregnaciones de óxidos de hierro	N.A.	

<i>Profundidad (m)</i>	<i>Observación de ripios</i>	<i>Interpretación en sondeo eléctrico</i>	<i>Unidad asociada</i>
74 - 77	Arenisca cuarzosa color gris claro con frecuentes bandeamientos de arenisca lodosa color gris oscuro	N.A.	
77 - 83	Arenisca cuarzosa de grano medio a fino de tonalidades rojizas con fragmentos amorfos de arenisca cuarzosa, y ocasionales bandeamientos de arenisca cuarzosa de color gris claro	N.A.	Miembro Inferior de la Formación los Santos (K ₁ lsmi)
83 - 91	Intercalaciones de arenisca cuarzosa de color gris claro con contacto transicional a arenisca cuarzosa de tonalidades rojizas con fragmentos amorfos de arenisca color gris claro	N.A.	
91 - 96	Arenisca de tonalidades rojizas con frecuentes cuerpos y lentejones amorfos de arenisca cuarzosa de grano fino color gris	N.A.	
96 - 117	Intercalaciones de arenisca cuarzosa color gris con frecuentes bandas de areniscas de grano fino ligeramente lodosa de tonalidades rojizas con fragmentos amorfos embebidos dentro de la matriz silícea	N.A.	
117 - 125	Arenisca de tonalidades rojizas con intercalaciones de arenisca cuarzosa color gris claro con impregnaciones de óxidos de hierro	N.A.	

* *Nota.* PC35: punto de concesión 35; m.s.n.m: metros sobre el nivel del mar; N.A.: no aplica; K₁lsm: Miembro Superior de la Formación los Santos; K₁lsmm: Miembro Medio de la Formación los Santos; K₁lsmi: Miembro Inferior de la Formación los Santos.

Tabla 14E

Descripción y análisis de perforación reportada en el PC37, Mesa de Los Santos, Santander.

PC37			
<i>Localización: 1250151 N; 1114619 E; Altura 1641 m.s.n.m</i>			
<i>Profundidad (m)</i>	<i>Observación de núcleos</i>	<i>Interpretación en sondeo eléctrico</i>	<i>Unidad asociada</i>
0 - 3	Capa vegetal y arcilla	N.A.	Suelo residual del Miembro Superior de la Formación Los Santos (K ₁ lsms)
4 - 91	Roca sólida y roca fracturada	N.A.	Formación Los Santos
92 - 98	Roca con intercalaciones de arcilla	N.A.	(K ₁ ls)
99 - 102	Roca sólida	N.A.	

* *Nota.* PC37: punto de concesión 37; m.s.n.m: metros sobre el nivel del mar; N.A.: no aplica; K₁ls: Formación los Santos.

Anexo F

Pruebas de bombeo en la extensión del Miembro Superior de la Formación Los Santos (K₁l/sms).

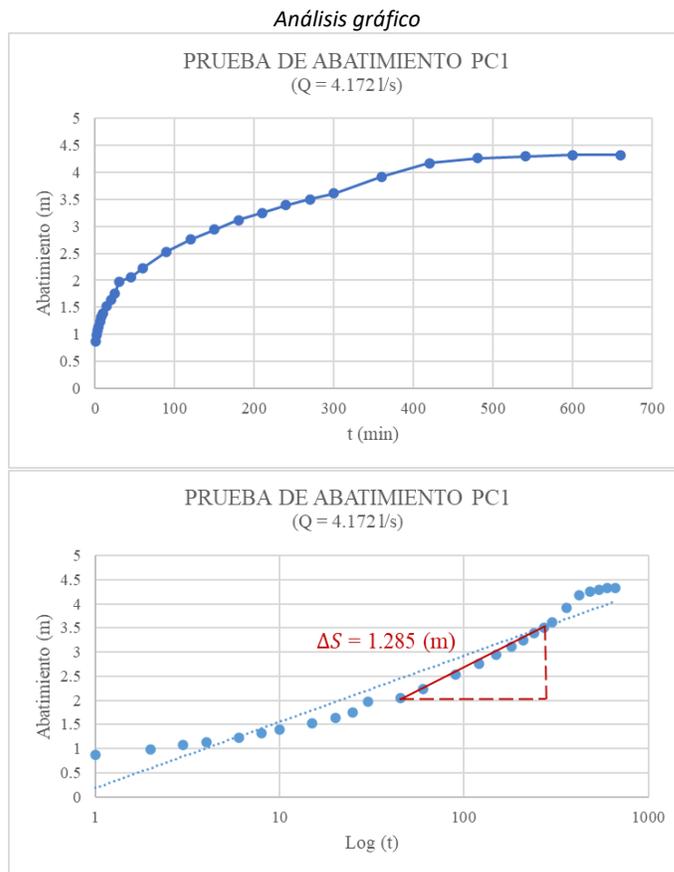
En las Tablas 1F y 2F se muestran pruebas de bombeo representativas para el área de estudio con su respectiva interpretación de parámetros hidráulicos.

Tabla 1F

Prueba de bombeo y parámetros hidráulicos del PC1, Mesa de Los Santos, Santander.

Prueba de abatimiento en pozo profundo (PC1)	
Profundidad del pozo: 40 m	Nivel estático: 31.82 m
Profundidad de rejillas: 31 - 40 m	Equipo de bombeo: Bomba sumergible 2HP

Tiempo [min]	Abatimiento [m]	Q Bombeo [l/s]
0	0	
1	0.87	4.231
2	0.98	4.082
3	1.07	
4	1.13	
6	1.23	4.297
8	1.32	
10	1.39	
15	1.53	4.239
20	1.64	
25	1.75	
30	1.98	4.089
45	2.05	4.207
60	2.23	
90	2.53	
120	2.76	4.151
150	2.94	
180	3.12	
210	3.25	
240	3.39	
270	3.50	4.151
300	3.61	
360	3.92	
420	4.17	
480	4.26	4.097
540	4.30	
600	4.32	4.175
660	4.32	
Q prom		4.172



Parámetros hidráulicos Método de Jacob $T = 0.183 * \frac{Q}{\Delta S}; T = K * b$	Q = 0.0042 m³/s T = 110.715 m²/día b = 9 m K = 6.491 m/día
---	---

*Nota. Q: caudal; prom: promedio; min: minutos; m: metros; l/s: litros por segundo; T: transmisividad; b: espesor saturado; K: conductividad hidráulica

Anexo G

Hidroquímica del agua subterránea del Sistema Acuífero del Miembro Superior de la Formación Los Santos (K1lsms) para el año 2008.

En la Tabla 1G se adjunta el balance iónico, pH, conductividad eléctrica y las concentraciones de los iones de HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ y Fe proporcionados por el INGEOMINASⁱ, las cuales fueron analizadas en el año 2008 y que fueron usadas para establecer los Niveles de Fondo Químico Natural de los acuíferos localizados en el Miembro Superior de la Formación los Santos.

Tabla 1G

Hidroquímica de los puntos de agua subterránea para el año 2008, Mesa de los Santos, Santander. Fuente: INGEOMINAS.

ID Inventario	COORDENADAS PLANAS MAGNA SIRGAS BOGOTA ZONE			Acuífero	% Bal	pH	$\chi_{25^\circ\text{C}}$	HCO_3^-	Cl ⁻	NO_3^-	PO_4^{3-}	SO_4^{2-}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Fe
	NORTE	ESTE	ALTURA														
A1	1256614.875	1115072.663	1665.735	Somero	-4%	5.58	128.7	36.60	17.3	0.5	1.092	12.13	5.15	1.20	17.10	7.00	0.34
A2	1255991.558	1115725.218	1689.209	Somero	-4%	4.50	26.0	12.20	1.4	0.6	0.010	1.30	3.01	0.13	1.70	0.72	0.03
A3	1254702.483	1115207.775	1686.275	Somero	1%	5.11	432.0	80.50	30.7	24.9	0.010	41.20	43.80	2.34	22.60	6.40	0.01
A5	1254785.947	1114989.37	1692.997	Somero	4%	5.11	235.0	97.60	17.3	0.5	0.033	6.10	24.60	1.13	20.60	8.40	0.28
A6	1255886.35	1115614.023	1680.847	Somero	-8%	4.19	27.3	14.60	1.4	0.5	0.013	0.07	2.80	0.11	1.80	0.70	0.66
A7	1253122.738	1114180.433	1686.373	Somero	4%	4.19	352.0	31.70	38.4	16.9	0.013	44.80	22.40	1.30	37.40	8.00	0.03
A10	1251447.029	1113781.853	1630.83	Somero	-53%	5.48	68.0	34.20	46.5	4.7	0.100	0.07	10.40	0.49	0.76	0.32	0.01
A11	1248848.063	1114683.55	1727.593	Somero	-41%	6.43	38.2	19.50	1.4	0.5	0.010	0.07	1.27	0.50	1.00	0.30	3.90
A12	1248705.32	1110302.681	1683.358	Somero	5%	6.86	54.5	43.90	40.6	1.0	0.018	22.80	22.00	1.82	26.40	7.16	0.01
A15	1245966.768	1113314.854	1679.342	Somero	4%	5.28	109.2	19.50	10.2	19.8	0.010	0.07	9.12	2.37	6.77	2.62	0.01
NI-PAI	1115230	1254638		Somero	-6%	5.31	94.7	43.90	9.4	0.9	0.010	0.07	10.40	0.30	6.40	2.65	0.57
NI-PAI	1115876	1255065		Somero	4%	5.88	118	66.00	4.4	1.7	0.011	0.07	23.30	0.39	2.96	0.56	0.01

ID Inventario	COORDENADAS PLANAS MAGNA SIRGAS BOGOTA ZONE			Acuífero	% Bal	pH	$\chi_{25^{\circ}\text{C}}$	HCO_3^-	Cl ⁻	NO_3^-	PO_4^{3-}	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Fe
	NORTE	ESTE	ALTURA														
NI-PAI	1115896	1254911		Somero	1%	7.08	78.3	53.70	1.4	1.5	0.010	0.07	16.60	0.17	2.10	0.86	0.01
A19	1253943.917	1114970.721	1702.522	Superior	-4%	5.39	121.0	31.70	4.0	11.7	0.025	22.80	13.50	1.19	7.89	3.35	0.08
A20	1253963.635	1115664.79	1703.276	Superior	4%	5.60	311.0	65.90	22.7	16.5	0.179	32.30	12.90	4.54	34.60	13.20	0.09
A23	1253831.468	1115205.642	1709.438	Superior	1%	5.96	175.0	102.00	2.0	0.5	0.010	1.40	33.10	0.97	1.42	0.60	0.01
A24	1251582.783	1115993.845	1704.075	Superior	-3%	5.14	89.0	26.80	10.0	7.2	0.040	1.10	6.05	1.53	6.89	2.96	0.07
A25	1249675.813	1112821.943	1714.799	Superior	-6%	6.09	12.6	4.90	1.2	0.5	0.020	0.07	0.42	0.10	1.50	0.62	0.01
A27	1248484.241	1110910.063	1676.646	Superior	-2%	6.56	75.5	43.90	1.4	0.5	0.027	0.07	8.60	3.10	1.10	0.42	0.01
A28	1249026.76	1111427.842	1687.962	Superior	-2%	6.89	96.3	61.00	0.5	0.5	0.226	0.07	11.70	4.60	0.33	0.14	0.90
A29	1250211.941	1112360.999	1695.249	Superior	-5%	5.14	103.0	29.30	13.3	1.2	0.010	0.30	7.05	0.38	9.02	1.04	0.01
A32	1248269.117	1111199.445	1678.656	Superior	-4%	5.62	26.7	14.60	1.4	0.5	0.010	0.07	2.18	0.75	1.80	0.76	0.01
A33	1250372.977	1111578.392	1687.479	Superior	-1%	5.06	40.0	22.00	1.4	0.5	0.016	0.07	4.36	1.02	1.90	0.80	0.01
A35	1250088.222	1111851.085	1691.083	Superior	-1%	5.47	50.0	29.30	1.4	0.5	0.186	0.07	5.54	1.84	1.67	0.68	0.01
P3	1253401.341	1111696.918	1628.779	Superior	-6%	5.53	122.0	80.50	1.4	0.5	0.016	0.07	15.90	4.09	1.57	0.66	2.88
P5	1252237.384	1114865.826	1671.669	Superior	-2%	5.49	103.0	43.90	4.4	7.3	0.250	1.06	10.70	1.32	5.80	2.42	0.03
M1	1251226.766	1115624.334	1675.841	Superior	-5%	4.41	26.0	8.80	4.0	0.5	0.010	0.07	1.30	0.46	2.67	0.96	0.01
M6	1244009.963	1107357.89	1641.812	Superior	-4%	6.48	68.7	19.50	6.7	0.5	0.100	8.90	4.20	0.95	6.56	2.78	1.04
NI-PPI	1116974	1252844		Superior	-1%	4.62	67.00	22.00	9.4	1.4	0.011	0.07	3.58	0.38	8.01	3.24	0.31
NI-PPI	1116232	1255933		Superior	-5%	4.68	54.60	26.80	4.0	0.5	0.011	1.10	6.61	0.52	2.81	1.14	0.14
NI-PPI	1110980	1252306		Superior	-1%	4.59	12.00	4.90	1.4	0.5	0.016	0.07	0.18	0.06	2.10	0.82	0.12
NI-PPI	1111049	1250346		Superior	-4%	4.03	15.00	7.10	1.4	0.6	0.010	0.07	0.49	0.05	2.60	0.44	0.01
NI-PPI	1110871	1251363		Superior	-6%	4.64	21.00	7.30	2.7	0.5	0.031	1.30	0.55	0.18	3.10	1.18	0.15
NI-PPI	1110665	1251235		Superior	-2%	3.9	30.00	7.30	2.7	5.3	0.010	0.07	1.61	0.30	3.13	1.20	0.01
NI-PPI	1110945	1248672		Superior	-3%	6.11	89.70	56.00	1.4	0.7	0.036	0.07	10.30	3.80	1.69	0.66	0.01
NI-PPI	1111152	1249263		Superior	-4%	5.95	76.10	46.40	1.4	0.6	0.133	0.07	8.20	2.81	2.00	0.84	0.01
NI-PPI	1115008	1249241		Superior	4%	5.63	56.30	22.00	4.4	0.5	0.011	0.10	4.90	0.12	6.10	0.52	0.15
NI-PPI	1110810	1249453		Superior	-3%	6.01	148.80	93.00	1.4	0.5	0.016	0.90	17.00	6.43	2.36	1.00	0.01

ID Inventario	COORDENADAS PLANAS MAGNA SIRGAS BOGOTA ZONE			Acuífero	% Bal	pH	$\chi_{25^{\circ}\text{C}}$	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Fe
	NORTE	ESTE	ALTURA														
NI-PPI	1114369	1248628		Superior	-4%	8.02	164.2 0	107.00	5.5	0.5	0.219	0.07	30.30	0.72	3.60	1.50	0.01

* *Nota.* % Bal: balance iónico; A: aljibe; P: Pozo; M: manantial; NI-PAI: no incluido, punto de aljibe del INGEOMINAS; NI-PPI: no incluido, punto de pozo del INGEOMINAS.

ⁱ INGEOMINAS (2008). Informe de resultados de laboratorio del proyecto SUB08-21, Exploración de Aguas Subterráneas, realizado en torno al “Proyecto de investigación geológica e hidrogeológica en la Mesa de los Santos, sector noreste de Curití y borde Occidental del Macizo de Santander”. 2007.

Anexo H*Hidroquímica de agua subterránea en época lluviosa, Mesa de Los Santos, Santander.*

En la Tabla 1H se adjunta el balance iónico, pH, conductividad eléctrica y las concentraciones de los iones de HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ y Fe obtenidas de muestras de aguas subterráneas colectadas en octubre del año 2021, correspondiente a una época lluviosa de análisis.

Tabla 1H

ID	Acuífero	% Bal	pH	$\chi_{25^\circ\text{C}}$	HCO_3^-	Cl^-	NO_3^-	PO_4^{3-}	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Fe
A1	Somero	1%	5.80	177.9	26.22	50.5	28.9	0.460	24.88	13.77	3.38	21.07	39.18	0.08
A3	Somero	0%	6.46	279.0	97.55	70.0	9.3	0.040	6.11	27.69	0.84	48.88	11.42	0.08
A5	Somero	1%	6.49	342.0	131.69	63.9	28.6	0.050	34.99	51.99	3.86	45.46	16.10	1.33
A7	Somero	2%	5.19	656.0	18.90	162.7	83.3	0.040	33.71	20.88	0.31	138.95	3.96	0.10
A9	Somero	3%	5.85	105.1	36.58	21.6	2.1	0.040	7.38	11.67	0.37	19.80	0.48	0.65
A12	Somero	2%	6.37	492.0	47.56	144.2	0.7	0.040	4.74	21.77	1.57	77.72	20.12	0.09
A15	Somero	-1%	5.48	82.9	33.53	26.8	6.0	0.040	18.90	17.88	2.03	15.35	1.16	3.23
A20	Superior	2%	5.63	739.0	23.78	132.9	7.4	0.050	55.71	35.15	1.80	52.92	58.27	0.29
A23	Superior	1%	6.57	143.7	18.90	53.6	6.9	0.040	17.92	9.29	0.46	32.92	17.05	0.07
A24	Superior	2%	5.79	167.5	65.85	41.2	6.0	0.040	7.79	26.10	1.61	16.88	17.30	0.08
A25	Superior	2%	6.77	118.7	68.29	20.6	2.8	0.040	6.32	23.37	1.05	15.56	1.54	0.09
A26	Superior	4%	5.09	-	6.71	43.3	5.3	0.040	5.96	5.98	0.47	24.43	10.98	0.22
A27	Superior	1%	5.92	105.8	43.90	27.8	6.6	0.100	4.80	14.08	3.93	16.40	0.41	0.09
A28	Superior	0%	6.33	118.1	71.94	12.4	2.0	0.930	5.51	19.85	1.62	12.82	1.06	0.08
A29	Superior	-3%	5.46	77.4	4.88	41.2	12.3	0.060	0.70	4.95	1.71	22.00	0.84	0.05
A41	Superior	-4%	6.16	75.4	26.83	29.9	2.4	0.472	0.56	8.32	0.25	18.25	0.47	0.06
P2	Superior	13%	5.27	349.0	17.68	75.2	53.6	32.200	2.77	22.30	1.73	23.44	32.20	0.10
P3	Superior	1%	6.30	168.2	61.58	20.6	2.4	0.820	2.42	26.21	1.56	6.28	0.82	1.04
P4	Superior	0%	5.75	85.9	28.05	16.5	7.8	0.090	6.48	9.59	1.48	13.08	0.70	0.74
P10	Superior	0%	6.51	195.1	123.16	18.5	1.1	0.040	8.83	34.32	4.35	14.88	0.74	0.10

* Nota. % Bal: balance iónico; A: aljibe; P: Pozo; M: manantial.

Anexo I*Hidroquímica de agua subterránea en época seca, Mesa de Los Santos, Santander.*

En la Tabla II se adjunta el balance iónico, pH, conductividad eléctrica y las concentraciones de los iones de HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ y Fe obtenidas de muestras de aguas subterráneas colectadas a finales de febrero de 2022, correspondiente a una época seca de análisis.

Tabla II

ID	Acuífero	% Bal	pH	$\chi_{25^\circ\text{C}}$	HCO_3^-	Cl^-	NO_3^-	PO_4^{3-}	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Fe
A1	Somero	-1%	*	*	28.38	33.32	14.38	0.310	30.13	30.45	1.96	8.74	6.43	0.070
A3	Somero	0%	*	*	35.63	15.60	2.94	0.120	5.06	15.90	2.93	2.03	2.16	0.780
A5	Somero	0%	*	*	70.66	37.58	15.55	0.170	74.95	61.60	3.06	12.34	5.36	0.930
A9	Somero	-1%	*	*	30.20	26.23	3.99	0.310	1.00	13.88	2.69	8.06	1.76	1.540
A15	Somero	1%	*	*	30.80	13.47	10.10	0.050	5.87	13.96	1.18	7.84	2.16	0.720
A19	Superior	0%	*	*	11.47	10.64	8.28	0.090	4.09	8.80	0.96	3.63	1.09	0.070
A23	Superior	1%	*	*	14.49	20.56	11.01	0.130	11.08	15.80	1.06	7.79	1.07	0.070
A26	Superior	0%	*	*	9.66	7.80	15.27	0.040	4.86	9.40	1.92	2.09	0.62	0.070
A27	Superior	1%	*	*	42.27	20.56	8.97	0.050	4.91	17.20	5.76	4.67	0.52	0.070
A29	Superior	0%	*	*	30.20	9.93	3.47	0.150	4.37	13.70	2.44	0.80	0.25	0.070
A41	Superior	1%	*	*	15.10	18.43	2.27	0.130	1.80	8.80	2.44	4.79	0.36	0.070
P2	Superior	1%	*	*	22.95	40.41	47.75	0.090	25.82	23.20	18.24	2.32	4.41	0.070
P4	Superior	0%	*	*	54.35	11.34	7.59	0.090	6.37	14.40	7.20	3.16	1.18	1.660
P5	Superior	0%	*	*	51.94	9.93	8.14	0.880	4.40	19.60	3.84	1.37	1.02	0.510
P7	Superior	0%	*	*	27.18	7.80	1.42	0.090	0.66	10.40	1.58	1.16	0.24	0.070
P10	Superior	1%	*	*	120.78	10.64	7.44	0.190	1.00	35.20	8.16	0.86	0.52	0.070

* Nota. % Bal: balance iónico; A: aljibe; P: Pozo; M: manantial.

Anexo J

Mapa hidrogeológico de la zona de estudio a escala 1:25.000.

Debido a la escala de los mapas, estos han sido anexados de manera externa en un archivo PDF.

Anexo K

Variables usadas en los mapas de vulnerabilidad siguiendo los modelos DRASTIC y DRASTIC Modificado a escala 1:25.000.

Debido a la escala de los mapas, estos han sido anexados de manera externa en un archivo PDF.

Anexo L

Mapas de vulnerabilidad obtenidos por el método DRASTIC y DRASTIC Modificado a escala 1:25.000.

Debido a la escala de los mapas, estos han sido anexados de manera externa en un archivo PDF.

Anexo M

Estadística para la determinación de los Niveles de Fondo Químico Natural (NBL) de las aguas subterráneas del Sistema Acuífero del Miembro Superior de la Formación Los Santos (K1lsms).

A continuación, se presentan las pruebas de bondad del ajuste aplicadas a las muestras de los iones indicadores de contaminación y las gráficas de los datos según la distribución seleccionada para cada conjunto de datos analizados en las aguas subterráneas del Sistema Acuífero del K1lsms (Acuífero Somero y Acuífero Superior).

Nitrato (NO₃⁻) en el Acuífero Somero

Tabla 1M

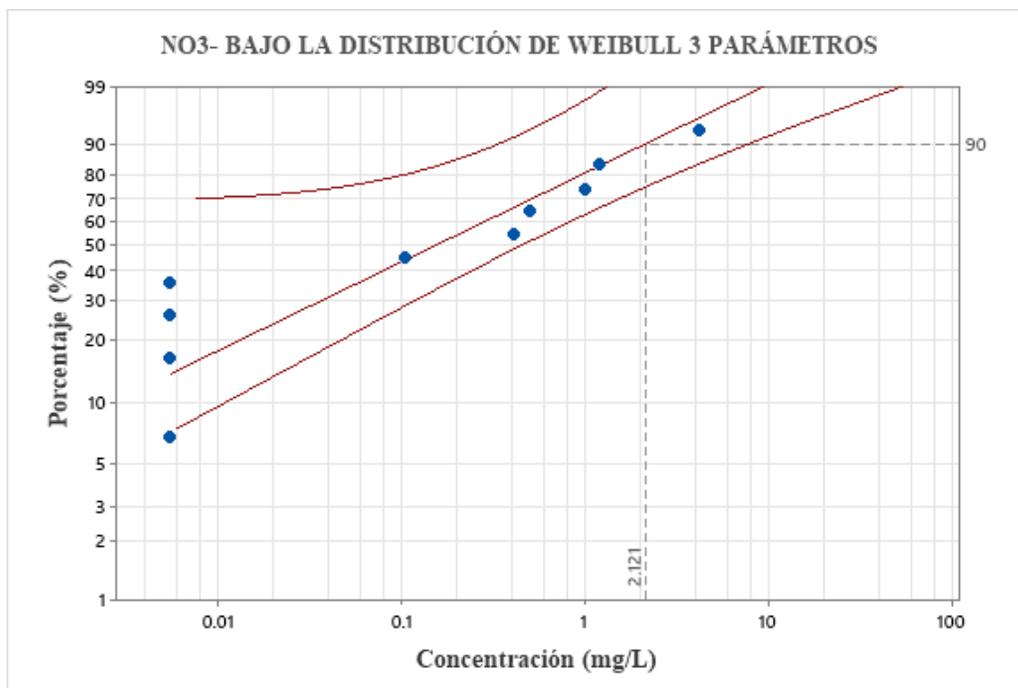
Prueba de bondad del ajuste del ion nitrato (NO₃⁻) en el Acuífero Somero.

Distribución	AD	P	Distribución	AD	P
Normal	1.467	<0.005	Valor extremo más pequeño	1.797	<0.010
Transformación Box-Cox	0.604	0.083	Valor extremo por máximos	1.036	<0.010
Lognormal	0.673	0.054	Gamma	0.907	0.024
Lognormal de 3 parámetros	1.680	*	Gamma de 3 parámetros	2.126	*
Exponencial	0.922	0.127	Logística	1.084	<0.005
Exponencial de 2 parámetros	1.427	<0.010	Loglogística	0.622	0.062
Weibull	0.880	0.020	Loglogística de 3 parámetros	1.511	*
Weibull de 3 parámetros	0.616	0.113	Transformación de Johnson	0.567	0.106

* Nota. AD: Anderson Darling; P: Factor P

Figura 1M

Distribución de la concentración del ion nitrato (NO₃⁻) bajo la distribución Weibull de tres parámetros



Fosfatos (PO_4^{3-}) en el Acuífero Somero

Tabla 2M

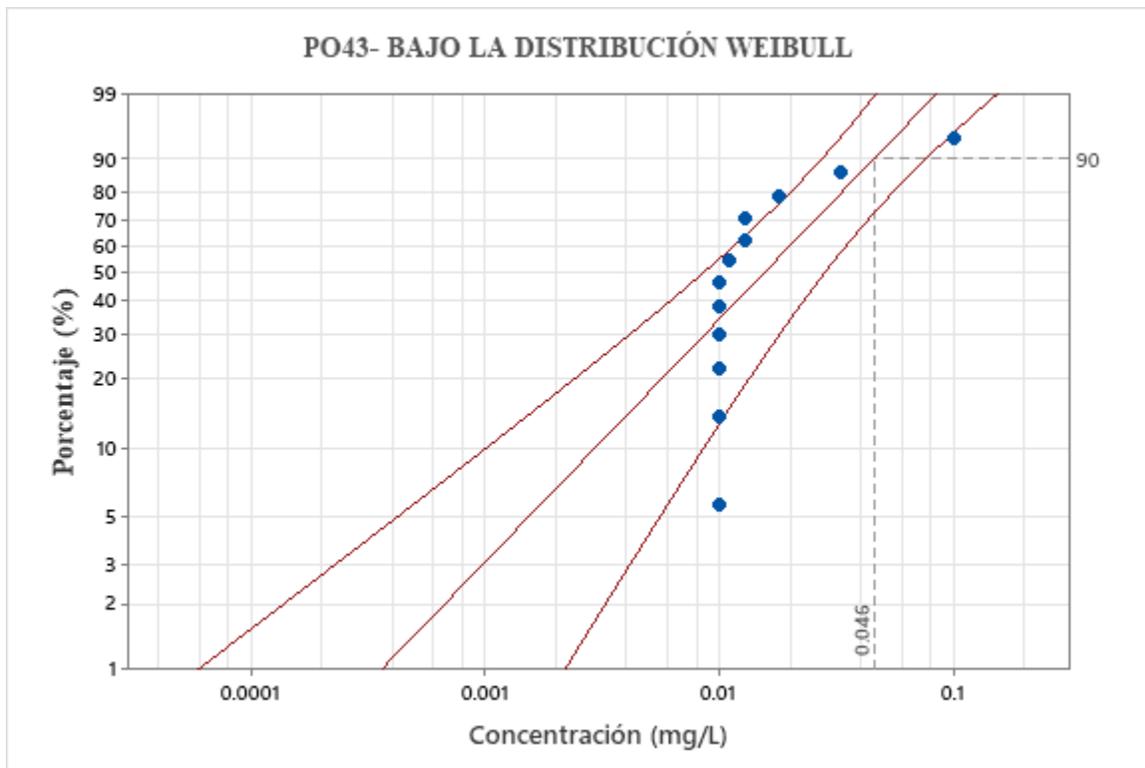
Prueba de bondad del ajuste del ion fosfato (PO_4^{3-}) en el Acuífero Somero

Distribución	AD	P	Distribución	AD	P
Normal	2.717	<0.005	Valor extremo más pequeño	2.890	<0.010
Transformación Box-Cox	1.082	<0.005	Valor extremo por máximos	2.424	<0.010
Lognormal	1.776	<0.005	Gamma	2.172	<0.005
Lognormal de 3 parámetros	1.919	*	Gamma de 3 parámetros	1.871	*
Exponencial	1.981	0.008	Logística	2.284	<0.005
Exponencial de 2 parámetros	4.974	<0.010	Loglogística	1.531	<0.005
Weibull	2.021	<0.010	Loglogística de 3 parámetros	1.365	*
Weibull de 3 parámetros	1.141	0.006			

* Nota. AD: Anderson Darling; P: Factor P

Figura 2M

Distribución de la concentración del ion fosfato (PO_4^{3-}) bajo la distribución Weibull de tres parámetros



Sulfato (SO₄²⁻) en el Acuífero Somero

Tabla 3M

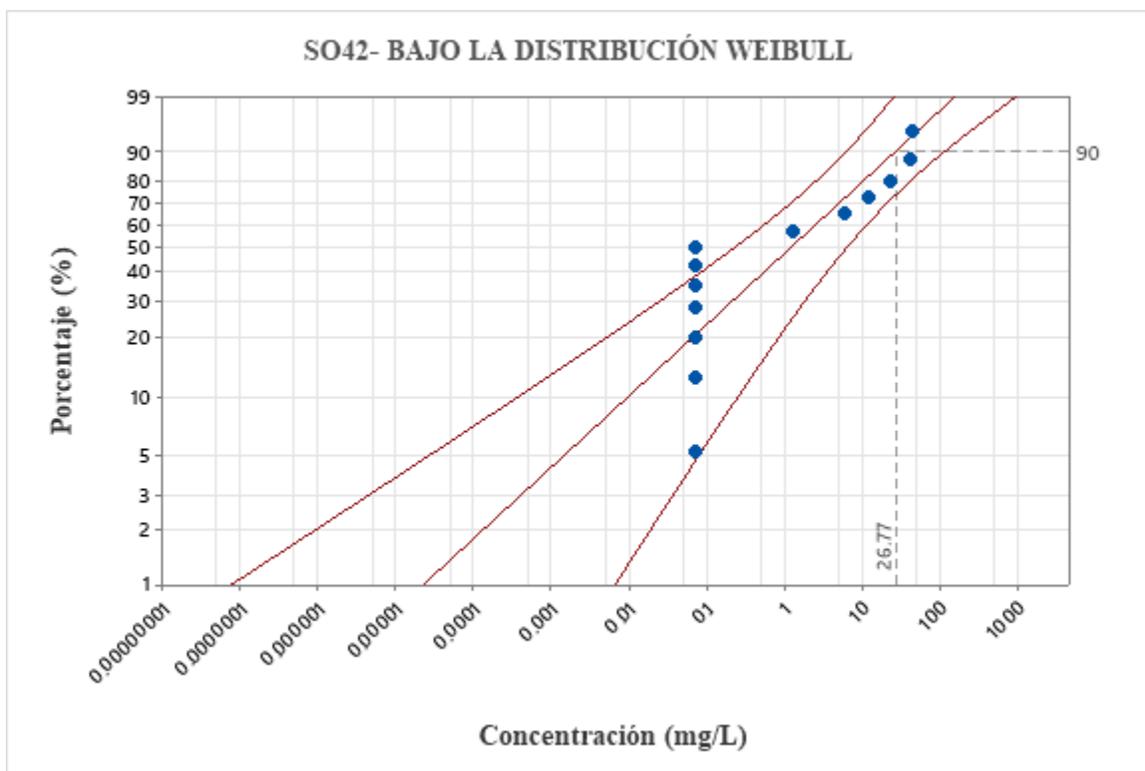
Prueba de bondad del ajuste del ion sulfato (SO₄²⁻) en el Acuífero Somero

Distribución	AD	P	Distribución	AD	P
Normal	1.907	<0.005	Valor extremo más pequeño	1.987	<0.010
Transformación Box-Cox	1.419	<0.005	Valor extremo por máximos	2.037	<0.010
Lognormal	1.419	<0.005	Gamma	1.337	<0.005
Lognormal de 3 parámetros	2.193	*	Gamma de 3 parámetros	2.545	*
Exponencial	13.305	<0.003	Logística	1.815	<0.005
Exponencial de 2 parámetros	4.700	<0.010	Loglogística	1.398	<0.005
Weibull	1.342	<0.010	Loglogística de 3 parámetros	1.954	*
Weibull de 3 parámetros	1.655	<0.005			

* Nota. AD: Anderson Darling; P: Factor P

Figura 3M

Distribución de la concentración del ion sulfato (SO₄²⁻) bajo la distribución Weibull de tres parámetros



Cloruro (Cl⁻) en el Acuífero Somero

Tabla 4M

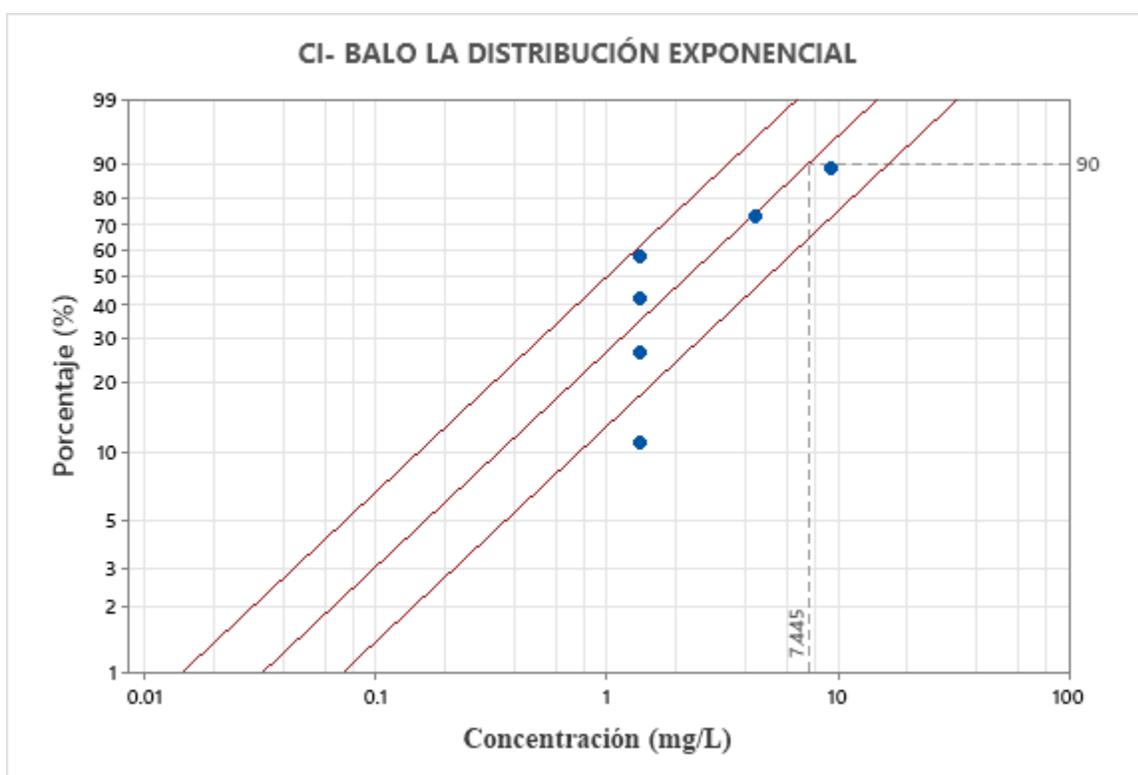
Prueba de bondad del ajuste del ion cloruro (Cl⁻) en el Acuífero Somero

Distribución	AD	P	Distribución	AD	P
Normal	0.958	0.006	Valor extremo más pequeño	1.01	<0.010
Transformación Box-Cox	0.976	0.005	Valor extremo por máximos	1.16	<0.010
Lognormal	0.905	0.008	Gamma	1	0.016
Lognormal de 3 parámetros	1.22	*	Gamma de 3 parámetros	1.28	*
Exponencial	0.81	0.16	Logística	0.98	<0.005
Exponencial de 2 parámetros	1.692	<0.010	Loglogística	0.96	0.005
Weibull	0.903	0.016	Loglogística de 3 parámetros	1.13	*
Weibull de 3 parámetros	1.012	0.013			

* Nota. AD: Anderson Darling; P: Factor P

Figura 4M

Distribución de la concentración del ion cloruro (Cl⁻) bajo la distribución Exponencial



Nitrato (NO₃⁻) en el Acuífero Superior

Tabla 5M

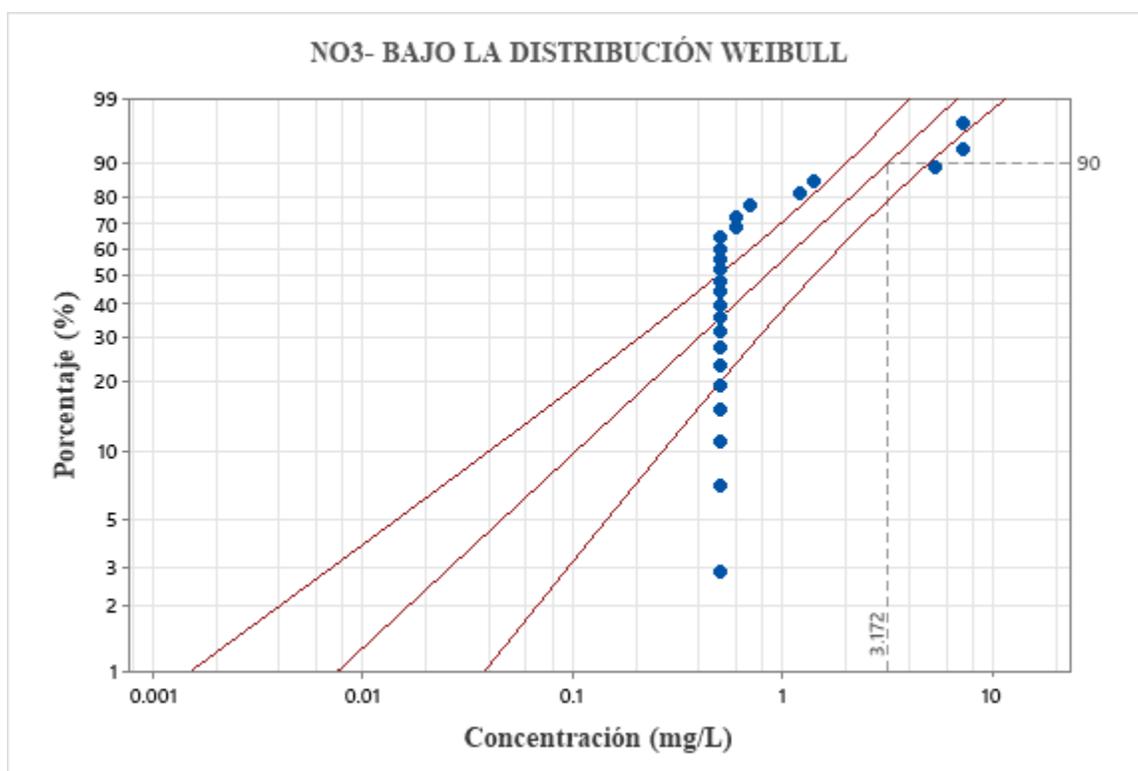
Prueba de bondad del ajuste del ion nitrato (NO₃⁻) en el Acuífero Superior

Distribución	AD	P	Distribución	AD	P
Normal	6,151	<0,005	Valor extremo más pequeño	5,915	<0,010
Transformación Box-Cox	3,989	<0,005	Valor extremo por máximos	6,594	<0,010
Lognormal	4,898	<0,005	Gamma	5,558	<0,005
Lognormal de 3 parámetros	4,674	*	Gamma de 3 parámetros	4,215	*
Exponencial	5,462	<0,003	Logística	5,893	<0,005
Exponencial de 2 parámetros	23,744	<0,010	Loglogística	4,600	<0,005
Weibull	4,899	<0,010	Loglogística de 3 parámetros	4,361	*
Weibull de 3 parámetros	4,201	<0,005			

* Nota. AD: Anderson Darling; P: Factor P

Figura 5M

Distribución de la concentración del ion nitrato (NO₃⁻) bajo la distribución Weibull de tres parámetros



Fosfatos (PO_4^{3-}) en el Acuífero Superior

Tabla 6M

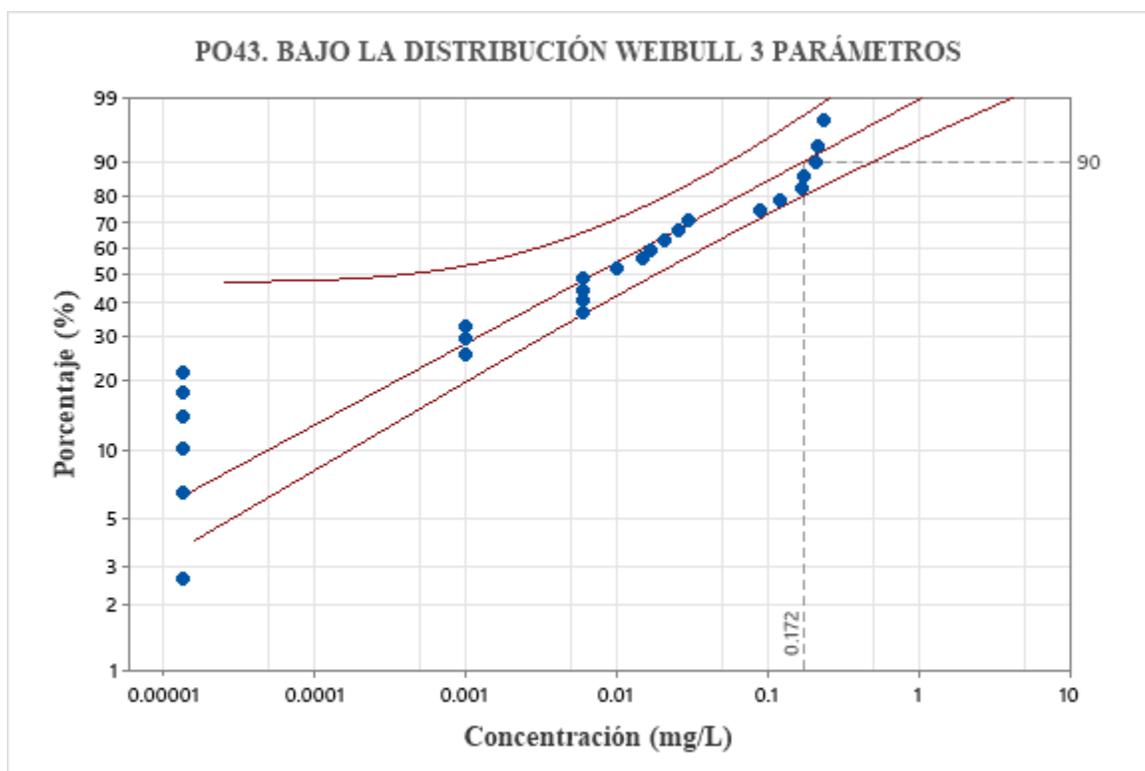
Prueba de bondad del ajuste del ion fosfato (PO_4^{3-}) en el Acuífero Superior

Distribución	AD	P	Distribución	AD	P
Normal	3,751	<0,005	Valor extremo más pequeño	3,741	<0,010
Transformación Box-Cox	1,192	<0,005	Valor extremo por máximos	3,860	<0,010
Lognormal	1,788	<0,005	Gamma	2,469	<0,005
Lognormal de 3 parámetros	3,696	*	Gamma de 3 parámetros	3,250	*
Exponencial	3,406	<0,003	Logística	3,580	<0,005
Exponencial de 2 parámetros	7,551	<0,010	Loglogística	1,649	<0,005
Weibull	2,122	<0,010	Loglogística de 3 parámetros	1,119	*
Weibull de 3 parámetros	0,883	0,025			

* Nota. AD: Anderson Darling; P: Factor P

Figura 6M

Distribución de la concentración del ion fosfato (PO_4^{3-}) bajo la distribución Weibull de tres parámetros



Sulfato (SO₄²⁻) en el Acuífero Superior

Tabla 7M

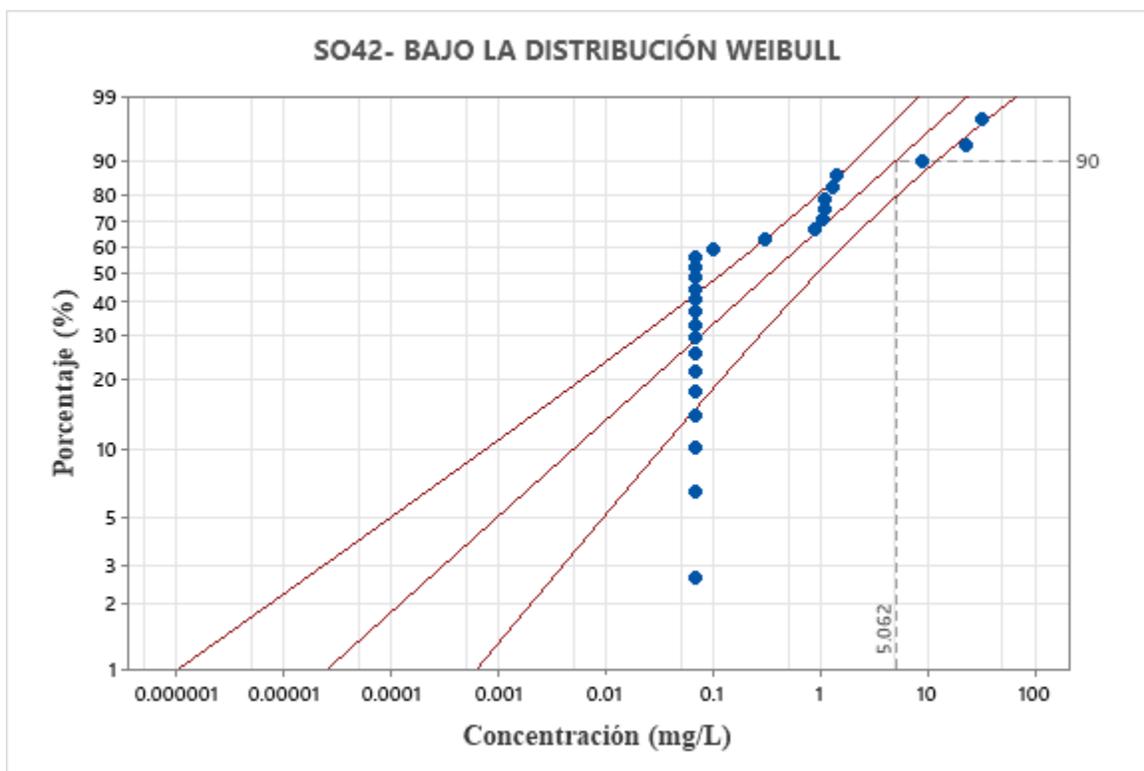
Prueba de bondad del ajuste del ion sulfato (SO₄²⁻) en el Acuífero Superior

Distribución	AD	P	Distribución	AD	P
Normal	6,869	<0,005	Valor extremo más pequeño	6,858	<0,010
Transformación Box-Cox	3,558	<0,005	Valor extremo por máximos	6,781	<0,010
Lognormal	3,101	<0,005	Gamma	4,149	<0,005
Lognormal de 3 parámetros	4,388	*	Gamma de 3 parámetros	3,951	*
Exponencial	26,720	<0,003	Logística	6,206	<0,005
Exponencial de 2 parámetros	22,775	<0,010	Loglogística	3,030	<0,005
Weibull	3,084	<0,010	Loglogística de 3 parámetros	3,955	*
Weibull de 3 parámetros	3,904	<0,005			

* Nota. AD: Anderson Darling; P: Factor P

Figura 7M

Distribución de la concentración del ion sulfato (SO₄²⁻) bajo la distribución Weibull de tres parámetros



Cloruro (Cl⁻) en el Acuífero Superior

Tabla 8M

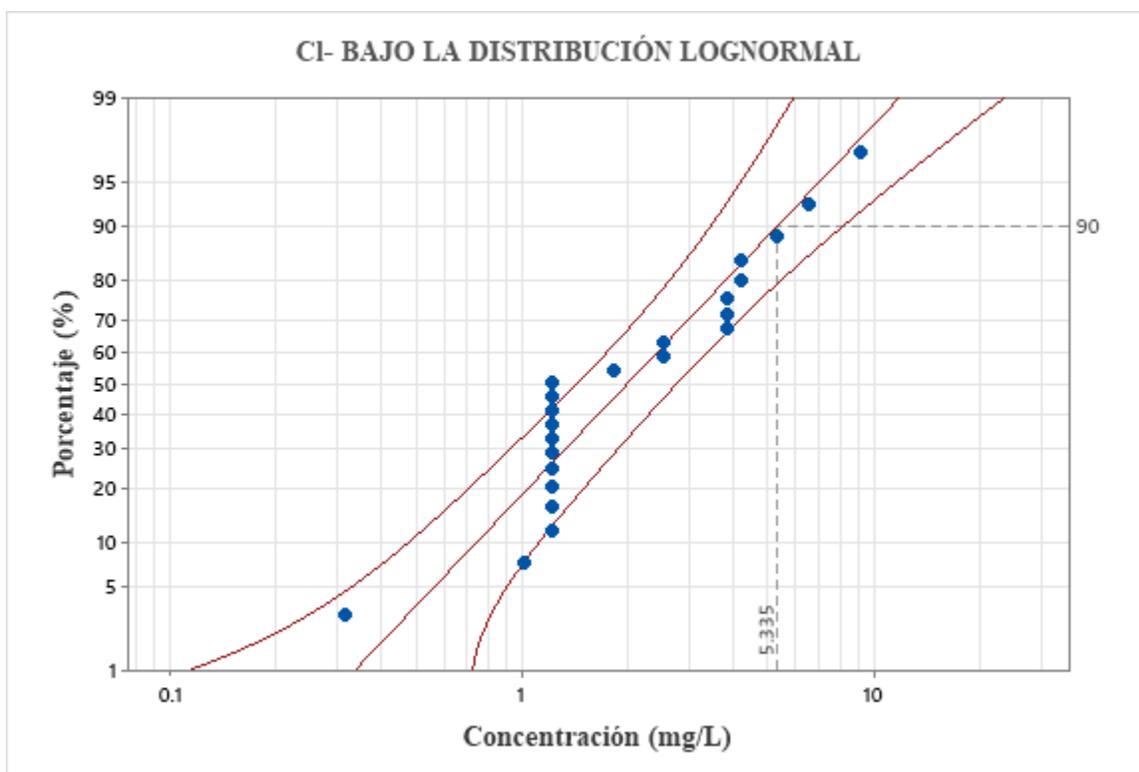
Prueba de bondad del ajuste del ion cloruro (Cl⁻) en el Acuífero Superior

Distribución	AD	P	Distribución	AD	P
Normal	1.791	<0.005	Valor extremo más pequeño	2.33	<0.010
Transformación Box-Cox	1.249	<0.005	Valor extremo por máximos	1.69	<0.010
Lognormal	1.249	<0.005	Gamma	1.38	<0.005
Lognormal de 3 parámetros	1.243	*	Gamma de 3 parámetros	1.4	*
Exponencial	1.88	0.011	Logística	1.64	<0.005
Exponencial de 2 parámetros	1.267	0.03	Loglogística	1.33	<0.005
Weibull	1.321	<0.010	Loglogística de 3 parámetros	1.27	*
Weibull de 3 parámetros	1.195	<0.005			

* Nota. AD: Anderson Darling; P: Factor P

Figura 8M

Distribución de la concentración del ion cloruro (Cl⁻) bajo la distribución Lognormal



Anexo N

Mapas de vulnerabilidad Vs Nivel de Fondo Químico Natural a escala 1:25.000

Debido a la escala de los mapas, estos han sido anexados de manera externa en un archivo PDF.