

Guía Metodológica para la Identificación de Zonas Potenciales de Recarga de Acuíferos



TABLA DE CONTENIDO

Introducción.....	9
1. Marco institucional	12
2. Marco normativo	14
3. Marco conceptual	17
3.1 Proceso de recarga de acuíferos en el ciclo hidrológico	19
4. Objetivos de la Guía	21
4.1 Objetivo general.....	21
4.2 Objetivos específicos	22
5. Alcance de la Guía.....	22
6. Antecedentes para definición de la metodología.....	23
7. Descripción de componentes, subcomponentes y variables empleados en la metodología	29
7.1 Componente suelo.....	31
7.1.1 Subcomponente cobertura de la tierra.....	31
7.1.1.1 Descripción de la variable cobertura de la tierra.....	33
7.1.1.1.1 Método para la calificación de la variable Cobertura	34
7.1.1.1.2 Verificación en campo de la variable cobertura de la tierra.....	36
7.1.1.1.3 Consideraciones de la implementación de la variable cobertura a escalas detalladas.....	38
7.1.2 Subcomponente relieve.....	40
7.1.2.1 Densidad de drenaje.....	41
7.1.2.2 Índice Topográfico de Humedad.....	42
7.1.2.3 Insumos para la valoración del relieve en el proceso de recarga.....	42
7.1.2.4 Método para la calificación de la variable	43
7.1.2.4.1 Mapa de densidad de drenaje	43
7.1.2.4.2 Índice Topográfico de Humedad.....	47
7.1.2.5 Verificación en campo de la variable relieve	49
7.1.2.6 Consideraciones de la implementación de la variable relieve a escala 1:25.000.....	50
7.1.3 Subcomponente suelos.....	51
7.1.3.1 Grupo Textural (GT).....	52

7.1.3.2 Drenaje natural (DN)	56
7.1.3.3 Verificación en campo de la variable suelos	62
7.1.3.4 Consideraciones de la implementación de la variable suelos a escala 1:25.000	62
7.2 Componente geología	63
7.2.1 Subcomponente litología	63
7.2.1.1 Características texturales	64
7.2.1.2 Método de clasificación de la variable.....	66
7.2.1.3 Verificación en campo de la variable litología.....	74
7.2.1.4 Consideraciones de la implementación de la variable litología a escala 1:25.000 o más detalladas	75
7.2.2 Subcomponente incidencia geoestructural	80
7.2.2.1 Densidad de lineamientos	82
7.2.2.2 Conectividad de los lineamientos	82
7.2.2.3 Orientación preferencial de los lineamientos	83
7.2.2.4 Zonas de daño y su influencia en el desarrollo de permeabilidad secundaria en las rocas	84
7.2.2.5 Análisis de la posición de las discontinuidades con respecto al campo de esfuerzos.....	85
7.2.2.6 Insumos para la valoración de la incidencia geoestructural en el proceso de recarga	86
7.2.2.7 Método para la calificación de la variable	87
7.2.2.8 Mapa de conectividad de lineamientos	92
7.2.2.9 Definición de las zonas de daño de las fallas	95
7.2.2.10 Verificación en campo de la variable incidencia estructural	97
7.2.2.10.1 Sugerencias para la descripción de redes de fractura en campo	97
7.2.2.10.2 Sugerencias para la cuantificación de la conectividad de redes de fractura en el campo.....	98
7.2.2.10.3 Métodos para la definición del espesor de la zona de daño de las fallas en el campo	100
7.2.2.11 Consideraciones de la implementación de la variable incidencia geoestructural a escala 1:25,000 ...	102
8. Proceso de identificación de las potenciales zonas de recarga, mediante algebra de mapas	103
8.1 Análisis estadístico exploratorio y proceso físico.....	106
8.2 Sumatoria lineal ponderada de los criterios para la definición de zonas potenciales de recarga.	110
8.3 Método objetivo. Importancia de los criterios a través de la correlación intercriterio (CRITIC).....	111
8.4 Método subjetivo. Proceso Analítico Jerárquico (PAJ).	116
8.5 Sensibilidad del método e importancia de un llenado inteligente.....	121
8.6 Integración aditiva de ambos métodos.....	123
8.7 Sumatoria lineal ponderada.....	124
9. Hoja de ruta metodológica propuesta	128

9.1 Fase Previa.....	128
9.1.1 Definición de la escala de trabajo de la guía.....	129
9.1.2 Determinación del grupo de trabajo requerido	130
9.2 Aplicación de la metodología	130
9.3 Análisis de resultados	131
10. Referencias	133
Referencias bibliográficas.....	133
Referencias Metodologías.....	136
Referencias Incidencia Estructural	140
Referencias Litología.....	145
Referencias Relieve	147
Referencias SIG – análisis multicriterio	149

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 Protección de las zonas de recarga de acuíferos de conformidad con la normativa ambiental colombiana.....	16
Figura 2 Esquema del ciclo hidrológico en la recarga de acuíferos	17
Figura 3 Perfil del suelo	19
Figura 4 Régimen de flujo subterráneo y tiempos de residencia típicos de algunos acuíferos	20
Figura 5 Características de uso común en las referencias consultadas	29
Figura 6 Movimiento del agua a través de la cobertura vegetal y su llegada al suelo	33
Figura 7 Fundamento de la herramienta densidad de líneas.....	44
Figura 8 Mapa de centroides de los drenajes sencillos para la cuenca de los ríos Suratá y Tona	45
Figura 9 Mapa de densidad de drenaje de la cuenca de los ríos Suratá y Tona	46
Figura 10 Ilustración del cálculo del ITH para un píxel.....	48

Figura 11 Mapa de Índice Topográfico de Humedad para las cuencas de los ríos Suratá y Tona.....	49
Figura 12 Diagrama de clases texturales del suelo.....	52
Figura 13 Representación gráfica de las evidencias de óxido - reducción en el suelo relacionado con el drenaje	57
Figura 14 Distintos tipos de intersticios	64
Figura 15 Conductividad hidráulica (metros/día) para distintas litologías	68
Figura 16 Sección del flujograma para la calificación del material no litificado o depósitos	71
Figura 17 Sección del flujograma para la calificación textural de las rocas sedimentarias	72
Figura 18 Sección del flujograma para asignar la calificación textural a las rocas ígneas y metamórficas	73
Figura 19 Resultado final de la evaluación de la variable litología en las cuencas de los ríos Suratá y Tona.....	73
Figura 20 Correlación positiva entre el espesor de la zona de daño y la permeabilidad desarrollada.....	85
Figura 21. Calificación de los rasgos lineales según su posición con respecto al esfuerzo máximo. A) Distribución de los esfuerzos tensionales y compresivos y desarrollo de fracturas de diferente naturaleza bajo un campo de esfuerzos cuyo eje de compresión se dispone en dirección NW-SE. Tomada y modificada de Hillacre et al. (2018). B) Ejemplo de rasgos lineales calificados en las cuencas hidrográficas de los ríos Suratá y Tona, departamento de Santander. Dirección del esfuerzo máximo tomada de Velandia (2017).	90
Figura 22. Mapa de densidad de lineamientos para las cuencas de los ríos Suratá y Tona	92
Figura 23. Ejemplo de categorización de las relaciones topológicas entre lineamientos para las cuencas de los ríos Suratá y Tona, departamento de Santander.....	93
Figura 24. Mapa de conectividad de lineamientos en las cuencas de los ríos Suratá y Tona. Se puede establecer una relación con la distribución de los tipos de nodos en la figura anterior	94
Figura 25 Método de la ventana circular.....	99
Figura 26. Esquema que ilustra el análisis multicriterio que plantea la guía metodológica. Nótese que la alternativa elegida depende de las relaciones entre las capas criterio	105

Figura 27. Histogramas de correlación entre pares de variables fuera de la diagonal, y en la diagonal el histograma de cada variable para las cuencas de los ríos Suratá y Tona.....	108
Figura 28. Histogramas de correlación entre pares de variables fuera de la diagonal, y en la diagonal el histograma de cada variable para el caso de Valle del Cauca.....	109
Figura 29. Casillas de la matriz de comparación por pares usadas para las simulaciones	121
Figura 30. Diagrama de cajas de los pesos obtenidos por el método AHP, en el caso que los valores se asignen aleatoriamente.....	122
Figura 31. Diagrama de cajas de los pesos obtenidos por el método AHP, en el caso que los valores se asignen siempre mayores que 1 sobre la diagonal.....	123
Figura 32. Diagrama de cajas de los pesos obtenidos por el método AHP.	123
Figura 33. Flujograma que resume los pasos metodológicos propuestos en la presente guía para la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos.....	127

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Competencias Institucionales	13
Tabla 2 Resumen abreviado de artículos analizados	23
Tabla 3 Componentes, subcomponentes y variables empleados en la propuesta metodológica	29
Tabla 4 Calificación de cada variable.....	30
Tabla 5 Clasificación de Cobertura y uso del suelo	34
Tabla 6 Grupos texturales a partir de clases texturales.....	53
Tabla 7 Clasificación de grupos texturales	54
Tabla 8 Ejemplo de tabla de atributos del mapa de Geopedología.....	56
Tabla 9 Clasificación de drenaje natural	60
Tabla 10 Ejemplo de tabla de atributos del mapa de Geopedología.....	61
Tabla 11 Características texturales para identificar para material no litificado	67
Tabla 12 Características texturales para identificar para las rocas	67
Tabla 13 Valoración de la probabilidad de recarga	69

Tabla 14 Convenciones flujograma	69
Tabla 15. Valoración de la probabilidad de recarga de los lineamientos según su posición con respecto al esfuerzo máximo.....	91
Tabla 16. Valoración de la probabilidad de recarga de las fallas según su cinemática.	96
Tabla 17. Valores de reclasificación asociados a los criterios categóricos	113
Tabla 18. Ejemplo de matriz de correlación entre los criterios para el área del abanico del Quindío. Nótese la diagonal unitaria y la simetría de la matriz	114
Tabla 19. Desviaciones estándar calculadas para los criterios en el área del abanico del Quindío	115
Tabla 20. Cantidad de información para cada criterio en el abanico del Quindío.....	116
Tabla 21. Factores de ponderación finales para el área del abanico del Quindío.....	116
Tabla 22. Escala de importancia relativa de Saaty	117
Tabla 23. Valores de RI para diferentes números de criterios.....	120
Tabla 24. Perfil de los profesionales sugeridos para el desarrollo de la guía.....	130

LISTADO DE ECUACIONES

- Ecuación 1	47
- Ecuación 2: Infiltración del Suelo (ITH)	51
- Ecuación 3 Desplazamiento de la falla o segmento de la falla	95
- Ecuación 4 Criterio de escalado	112
- Ecuación 5 Cantidad de información del criterio	115
- Ecuación 6 Peso del criterio	116
- Ecuación 7 índice de constancia	119
- Ecuación 8 Radio de constancia de matriz	120
- Ecuación 9 Peso final del criterio	124
- Ecuación 10 Índice de zona potencial de recarga	126

Introducción

El agua subterránea como parte esencial del ciclo hidrológico juega un papel fundamental, aunque poco reconocido, para el bienestar humano, la sostenibilidad de los ecosistemas y para el desarrollo económico del país. Estas fuentes hídricas ofrecen importantes servicios ecosistémicos de aprovisionamiento, regulación hídrica, depuración natural, aportan flujo base a ríos, quebradas, arroyos, lagos y humedales, lo cual resulta esencial para preservar la química, la biología y la dinámica de los ecosistemas y el hábitat de muchas especies, además de la reducción de la vulnerabilidad frente a fenómenos de variabilidad y cambio climático.

En este contexto, la recarga de acuíferos es un proceso clave para garantizar la sostenibilidad de los estos ecosistemas y la provisión de servicios ecosistémicos de aprovisionamiento para consumo humano y actividades agropecuarias e industriales. Por ello, la protección de las áreas donde ocurre la recarga constituye una prioridad para la gestión ambiental y territorial del Estado.

En el ordenamiento jurídico colombiano, también reconoce la importancia de las zonas de recarga de acuíferos, desde los principios generales ambientales establecidos en el artículo primero de la Ley 99 de 1993, lo cual plantea a las autoridades ambientales competentes el reto de identificar y gestionar adecuadamente estas zonas.

En respuesta a esa necesidad, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM– y el Servicio Geológico Colombiano -SGC, en el marco del Programa Nacional de Aguas Subterráneas, han unido esfuerzos para elaborar la presente Guía Metodológica para la Identificación de Zonas Potenciales de Recarga de Acuíferos, con el fin de ofrecer lineamientos técnicos homogéneos y sustentados, dirigidos especialmente a las autoridades ambientales del país.

Además, durante el proceso de elaboración se contó con la participación de diversas consultorías y el apoyo del Delft Institute for Water Education (IHE) de los Países Bajos, así como con la contribución del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y la Universidad de Antioquia en la revisión y el aporte de insumos técnicos.

En el contexto de la guía, las zonas potenciales de recarga de acuíferos hacen referencia a aquellas áreas geográficas donde dadas sus características biofísicas intrínsecas, se favorece, en mayor o menor medida el proceso de infiltración del agua procedente de la lluvia, la escorrentía superficial u otras fuentes, independientemente del volumen y la variación de la precipitación. Este enfoque, considera la infiltración como el punto de partida del proceso de circulación del agua en el medio biofísico, que puede contribuir, posteriormente, a la recarga del acuífero. Además, estas características también reflejan la vulnerabilidad intrínseca de estas zonas ante potenciales fuentes de contaminación. Por ello, las zonas potenciales de recarga que se identifican mediante la metodología propuesta, representan las características intrínsecas de cada una de las variables priorizadas, sin depender de la precipitación. Este enfoque responde a la necesidad de generar conocimiento y otorgar herramientas para su protección, conforme a lo previsto en el marco normativo vigente.

De esta manera, es necesario señalar que la identificación de zonas potenciales de recarga corresponde a una fase dentro del proceso de caracterización del medio hidrogeológico. No obstante, serán los estudios de detalle los que permitirán determinar con precisión las zonas de recarga, estableciendo el paso desde la identificación de zonas potenciales hacia la definición de la recarga de acuíferos, con base en insumos, herramientas y consideraciones metodológicas a mayor resolución espacial y temática.

Por lo anterior, no hace parte del alcance de esta guía los lineamientos para la estimación o cuantificación de la tasa de recarga de acuíferos ni la definición de sistemas de flujo, aspectos abordados en otros instrumentos como la guía metodológica para la formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos - PMAA, que se complementa con la presente guía.

Con base en lo indicado, la propuesta metodológica para la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos se fundamenta en el análisis de dos componentes del medio biofísico: suelo y geología. El primero se subdivide en los subcomponentes cobertura de la tierra, relieve y suelos, mientras que el segundo comprende los subcomponentes litología e incidencia geoestructural. Para cada subcomponente se definieron variables específicas y criterios para su calificación, establecidos de acuerdo con su relevancia en el

proceso de recarga, con base en referencia bibliográficas nacionales e internacionales. Finalmente, se plantea una propuesta para asignar pesos relativos a los subcomponentes dentro de la ecuación empleada en la construcción del álgebra de mapas.

De este modo, tanto los criterios de calificación de variables como la ponderación de subcomponentes confieren flexibilidad a la guía, permitiendo su aplicación en distintos contextos, considerando la gran diversidad geográfica, geológica, hidrogeológica, edafológica y de coberturas vegetales del país, que generan efectos diferenciados en los procesos de recarga. Asimismo, cuando todas las variables se encuentren en una misma escala, puede aplicarse a diferentes escalas dado que se proponen recomendaciones metodológicas adaptadas a la escala regional, con orientaciones para obtener la información de cada variable a escalas detalladas.

Teniendo presente este alcance, la guía incluye una hoja de ruta metodológica que comprende el análisis preliminar de la información hidrogeológica disponible, la aplicación de la metodología y la interpretación de resultados, así como dos anexos, el primero contiene el manual de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos y el segundo contiene un documento con los métodos isotópicos y geoquímicos complementarios a la identificación de las zonas de recarga, los cuales pueden emplearse junto con otras herramientas hidrogeológicas en fases posteriores o en estudios de mayor detalle.

1. Marco institucional

La gestión del agua subterránea en Colombia se desarrolla dentro de un sistema institucional sólido, que involucra diversas entidades a nivel nacional, regional y, en algunos casos, local. Este capítulo presenta una descripción general de los roles y responsabilidades de las instituciones clave encargadas de la evaluación, monitoreo y definición de directrices para la protección y el uso sostenible de las aguas subterráneas en el país.

No obstante, persisten grandes desafíos en el manejo sostenible del agua subterránea, los acuíferos y sus zonas de recarga. Entre ellos se destacan la necesidad de mejorar la coordinación interinstitucional, el fortalecimiento de las capacidades técnicas y operativas de las entidades involucradas y, por supuesto, la asignación de recursos financieros adecuados para su gestión.

Por esta razón, es fundamental conocer las competencias y responsabilidades de las principales instituciones que intervienen en la gestión de estos recursos, con el fin de identificar oportunidades de articulación interinstitucional a diferentes niveles. Esto permitirá diseñar e implementar acciones concretas para la protección de las zonas de recarga de acuíferos, esenciales para garantizar el abastecimiento de agua a poblaciones grandes y pequeñas, la regulación del flujo hídrico, la prestación de servicios ambientales clave y el ordenamiento territorial basado en el recurso hídrico.

En este contexto, las principales instituciones con competencias en la gestión del agua subterránea son:

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: como rector de la política ambiental en Colombia, es responsable de definir las políticas y regulaciones en materia de gestión integral del agua.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) y Servicio Geológico Colombiano (SGC): tienen funciones relacionadas con el conocimiento hidrogeológico a escala regional y la evaluación del potencial de las aguas subterráneas.

- Autoridades ambientales: como máxima autoridad en su jurisdicción, son responsables de la gestión de estos recursos, brindando asesoría y apoyo a los entes territoriales en la identificación y priorización de áreas estratégicas, entre las cuales se incluyen las zonas de recarga de acuíferos.

En la **Tabla 1**, se presenta un resumen de las principales competencias institucionales de las entidades mencionadas.

Tabla 1. Competencias Institucionales

Entidad	Competencias
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Política ambiental, regulaciones, directrices u orientaciones para el uso, protección y manejo sostenible de recursos naturales renovables (aguas subterráneas).
Servicio Geológico Colombiano (SGC)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ampliar el conocimiento en materia de aguas subterráneas en el territorio nacional. ▪ Diseñar, participar y promover nuevos proyectos y estudios relacionados con la investigación de aguas subterráneas. ▪ Aplicar y desarrollar las metodologías tendientes a la evaluación del potencial de las formaciones geológicas para transmitir y almacenar agua. ▪ Elaborar la cartografía hidrogeológica del país y la construcción de modelos hidrogeológicos conceptuales. ▪ Impulsar, promover y divulgar el avance del conocimiento hidrogeológico del país.
Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Establecer las bases técnicas para clasificar y zonificar el uso del territorio nacional para los fines de la planificación y el ordenamiento ambiental del territorio. ▪ Obtener, almacenar, analizar, estudiar, procesar y divulgar la información básica sobre hidrogeología en el país. ▪ Acompañar a las autoridades ambientales competentes en la elaboración de estudios hidrogeológicos.
Autoridades Ambientales Competentes (AAC)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Máximas autoridades ambiental en su jurisdicción, encargadas de administrar el medio ambiente y los recursos naturales renovables y propender por su desarrollo sostenible. ▪ Participar en procesos de planificación y ordenamiento territorial para que el factor ambiental sea tenido en cuenta en las decisiones que se adopten.
Entes territoriales	Promocionar y ejecutar programas y políticas ambientales, expedir las disposiciones necesarias para adoptar las determinantes ambientales.

2. Marco normativo

Este capítulo presenta el marco normativo que sustenta la protección de las zonas de recarga de acuíferos en Colombia. Se relacionan las leyes, decretos y regulaciones que establecen los fundamentos legales para la identificación y protección de estas áreas estratégicas, esenciales para la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y el abastecimiento de agua a múltiples poblaciones.

Normativa aplicable

- Ley 9 de 1979, artículo 59 (Código Sanitario): establece que las entidades encargadas del suministro de agua potable deben ejercer control sanitario sobre la superficie situada sobre el estrato acuífero y las zonas de recarga, con el fin de evitar su contaminación.
- Ley 99 de 1993, artículo 1, numeral 4: dentro de los principios que rigen la política ambiental colombiana, se establece que las zonas de recarga de acuíferos deben ser objeto de protección especial.
- Ley 373 de 1997, artículo 10: dispone que, para evaluar la viabilidad del otorgamiento de concesiones de aguas subterráneas, las Autoridades Ambientales Competentes (AAC) deben realizar estudios hidrogeológicos y desarrollar acciones para la protección de las zonas de recarga. Además, establece que estos estudios deben contar con el apoyo técnico y científico del IDEAM y del Servicio Geológico Colombiano (antes INGEOMINAS).
- Decreto 1076 de 2015, artículo 2.2.2.1.3.8 (que compila el Decreto 2372 de 2010): Define que las zonas de recarga de acuíferos como áreas de especial importancia ecológica que gozan de protección especial, por lo que las autoridades ambientales deberán adelantar las acciones tendientes a su conservación y manejo, que podrán

incluir su designación como áreas protegidas bajo alguna de las categorías de manejo, previstas en la norma:

- Parque Nacional Natural
- Reserva Forestal Protectora
- Parque Natural Regional
- Distrito de Manejo Integrado
- Distrito de Conservación de Suelos
- Área de Recreación

→ Decreto 1076 de 2015, artículo 2.2.9.8.1.4 (Reglamentación de la Ley 99, art. 111): establece la modalidad de pago por servicios ambientales asociados a la regulación y calidad hídrica, priorizando las inversiones en:

- Áreas o ecosistemas estratégicos.
- Predios con nacimientos y cuerpos de agua.
- Zonas de recarga de acuíferos que abastecen acueductos municipales, distritales y regionales, así como distritos de riego.
- Áreas clave para la regulación y amortiguación de fenómenos hidrometeorológicos y geológicos extremos con impacto en la prevención de desastres naturales.

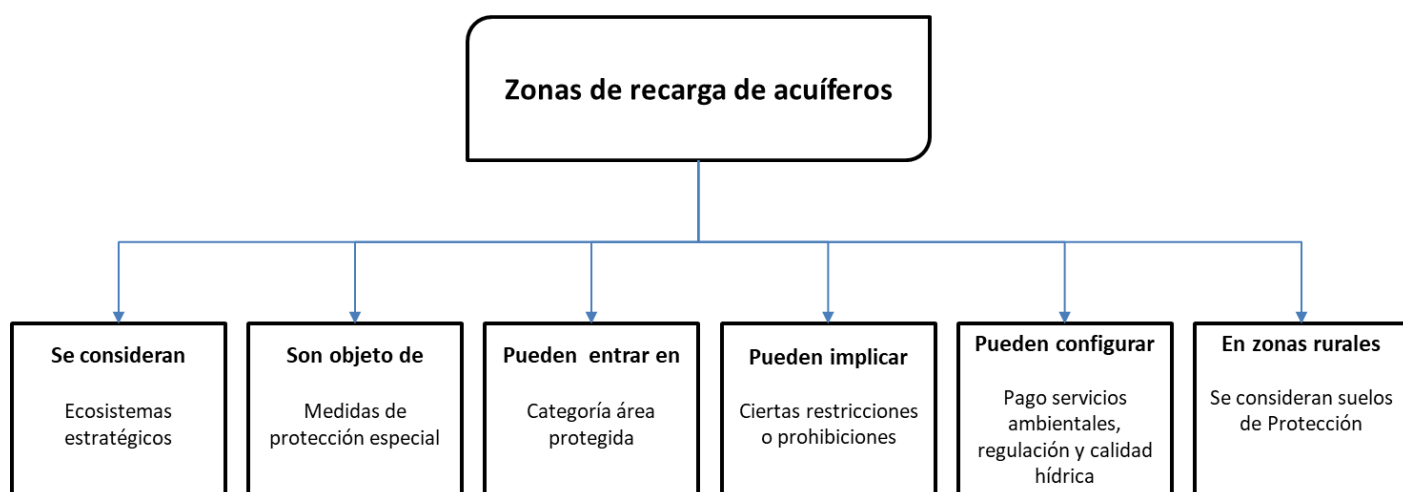
→ Decreto 1076 de 2015, artículo 2.2.3.3.4.3, numeral 13 (Capítulo de Vertimientos): prohíbe la disposición de vertimientos al suelo en zonas de alta recarga, previamente identificadas por la autoridad ambiental competente con base en la metodología establecida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Decreto 050, 2018, artículo 5).

→ Decreto 1077 de 2015 (que compila el Decreto 3600 de 2007): establece que, en áreas rurales, las zonas de recarga de acuíferos deben considerarse suelos de protección, en los términos del artículo 35 de la Ley 388 de 1997.

→ Decreto 1077 artículo 2.3.2.3.2.2.5. Se prohíbe la localización, construcción y operación de rellenos sanitarios en zonas de recarga de acuíferos

En la Figura 1, se presenta una síntesis de las principales disposiciones normativas vigentes en materia de protección de las zonas de recarga de acuíferos.

Figura 1 Protección de las zonas de recarga de acuíferos de conformidad con la normativa ambiental colombiana



En resumen, las zonas de recarga de acuíferos son ecosistemas estratégicos que, por su importancia ecológica, gozan de protección especial. Por ello, las autoridades ambientales deben implementar acciones para su conservación y manejo.

Estas acciones pueden incluir su designación como áreas protegidas, bajo alguna de las categorías de manejo establecidas en la normativa ambiental vigente. Asimismo, estas zonas pueden ser incluidas en proyectos que apliquen la modalidad de pago por servicios ambientales, específicamente en lo relacionado con la regulación y calidad hídrica.

Además, en estas áreas se restringen o prohíben ciertas actividades, y en las zonas rurales se consideran suelos de protección, de acuerdo con las disposiciones ambientales y de ordenamiento territorial.

3. Marco conceptual

Conforme a lo establecido en el Glosario Hidrológico Internacional¹, la recarga de un acuífero se define como la entrada natural o artificial de agua en la zona saturada del mismo. Por su parte, el área de recarga es aquella que suministra agua a un acuífero, ya sea por infiltración directa o a partir de una fracción de la escorrentía.

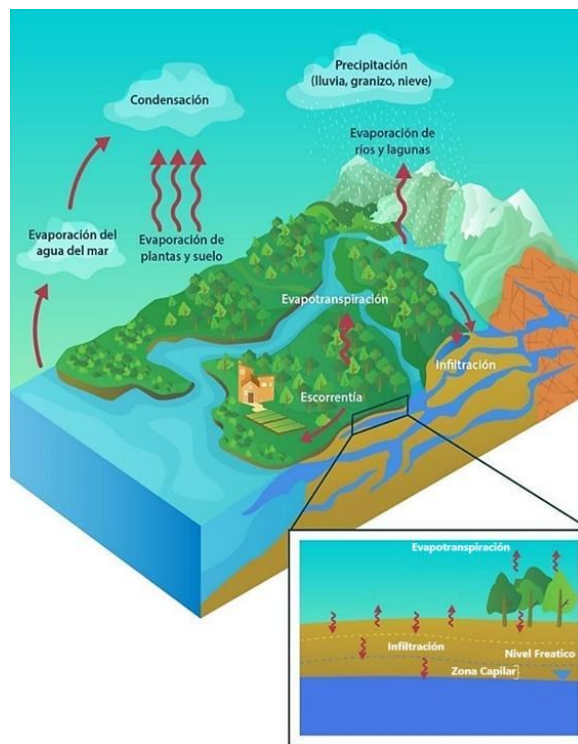
El origen del agua subterránea es predominantemente meteórico (proveniente de la precipitación), lo que hace que el concepto de recarga de acuíferos esté estrechamente vinculado al ciclo hidrológico. Como se ilustra en la figura 2, este ciclo comprende procesos como precipitación, condensación, evaporación, evapotranspiración, escorrentía superficial, infiltración y percolación, entre otros.

El agua precipita en forma de lluvia, granizo o nieve; sin embargo, una parte no llega a la superficie terrestre, pues es evaporada por la radiación solar. Otra fracción es retenida por la vegetación y utilizada en sus procesos de evapotranspiración.

Cuando el agua alcanza el suelo, una parte se evapora, mientras que otra se convierte en escorrentía, desplazándose hacia ríos, lagos, lagunas o, en última instancia, al mar. Adicionalmente, una fracción del agua se infiltra a través de los poros y fracturas de las rocas, ingresando al subsuelo. Bajo determinadas condiciones, este proceso da lugar a la recarga de los acuíferos.

Figura 2 Esquema del ciclo hidrológico en la recarga de acuíferos

¹ Glosario Hidrológico Internacional – OMM- 2012. Colectividad autor: Organización Meteorológica Mundial [983].



Nota. Tomada del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2018). Muestra el movimiento y almacenamiento del agua en diferentes puntos.

La alteración en los patrones de precipitación, el aumento en la intensidad y frecuencia de eventos extremos, y el deterioro de coberturas vegetales han generado impactos directos sobre la capacidad natural de recarga de acuíferos. Es por ello que la adaptación climática desde la formulación de medidas, está orientada a reducir la vulnerabilidad de los sistemas naturales y humanos frente a los efectos del cambio climático, garantizando su funcionamiento en escenarios variables e inciertos.

En el caso de los acuíferos, estas medidas pueden incluir desde la protección de zonas con potencial de recarga, la restauración de coberturas vegetales en áreas estratégicas, hasta la incorporación de medidas de manejo dentro de los instrumentos relacionados con el ordenamiento territorial alrededor del agua.

A su vez, la resiliencia en términos de gestión hídrica está enfocada a fortalecer la gobernanza del agua, implementar monitoreos continuos, diversificar las fuentes de abastecimiento, e incorporar soluciones basadas en la naturaleza que favorezcan la regulación hídrica y la

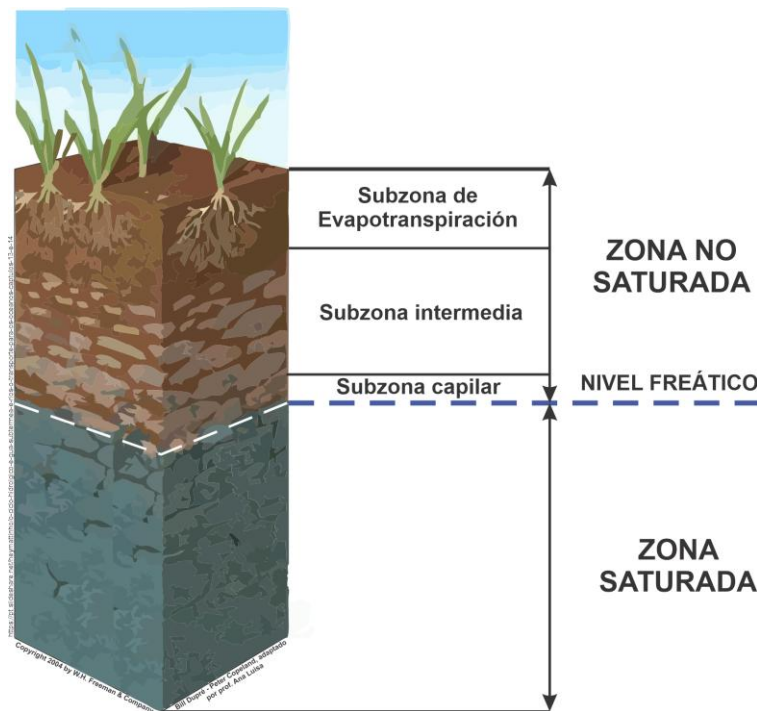
sostenibilidad de los acuíferos, teniendo como referente la protección de los recursos naturales.

3.1 Proceso de recarga de acuíferos en el ciclo hidrológico

La recarga de acuíferos ha sido un tema de estudio recurrente durante las últimas cinco décadas, no solo por la creciente presión sobre los recursos hídricos superficiales y subterráneos, sino también por el impacto generado por diversas actividades antrópicas.

Durante este proceso, el agua inicia su recorrido en la zona radicular, cuya profundidad varía según el tipo de suelo y la vegetación (Samper et al., 1999). En esta etapa, el agua se acumula en los poros del suelo hasta alcanzar su capacidad de campo, es decir, la máxima cantidad de agua que un suelo no saturado puede retener (Figura 3)

Figura 3 Perfil del suelo



Nota. La figura muestra una organización vertical de las capas que componen el suelo, desde la superficie hasta la roca madre. Cada capa, o horizonte, tiene características diferentes. Modificado de Vega (2001).

Si el suelo alcanza su capacidad de campo y satisface la demanda de evapotranspiración, el exceso de agua continúa su descenso vertical, convirtiéndose en recarga en tránsito (Schosinsky, 2006).

Este flujo vertical llega a la zona parcialmente saturada, donde la presión en los poros es menor que la presión atmosférica. Esta zona, de espesor variable, se caracteriza por la coexistencia de agua y aire en los espacios porosos, lo que genera fuerzas capilares que atraen el agua hacia la roca (Morales Behar, 2011). En esta región pueden formarse acuíferos colgados de carácter efímero, los cuales eventualmente generan un flujo sub horizontal, denominado flujo hipodérmico (Samper et al., 1999).

Desde allí, el flujo vertical continúa su descenso hasta alcanzar el nivel freático. Debajo de este nivel se encuentra la zona saturada, donde la presión del agua supera la atmosférica y los poros y fracturas están completamente llenos de agua (Morales Behar, 2011). En este punto, el proceso se denomina percolación o recarga, y el agua se desplaza a través de medios porosos o fracturados, siguiendo los gradientes hidráulicos locales o regionales.

Finalmente, el agua subterránea puede descargar en arroyos, quebradas, ríos, lagos, humedales o el mar, o emerger de forma natural a través de manantiales. También puede extraerse de manera artificial mediante pozos, túneles, galerías u otras obras de captación. El tiempo que transcurre desde su infiltración hasta su descarga, conocido como tiempo de residencia, puede variar desde unas pocas horas hasta miles de años, recorriendo distancias que van desde unos metros hasta varios kilómetros (Figura 4).

Figura 4 Régimen de flujo subterráneo y tiempos de residencia típicos de algunos acuíferos



Nota. Tomado de Foster, Tuinhof, Kemper, Garduño, & Nanni (2006).

Según Vélez y Vásquez (2004), la recarga de los acuíferos puede presentarse de dos formas:

1. Recarga natural: cuando el agua proviene de la precipitación (lluvias), de cuerpos de agua superficiales como ríos y lagos, o mediante transferencias entre unidades hidrogeológicas o acuíferos.
2. Recarga artificial: resultado de actividades humanas como irrigación, fugas en redes de acueducto o alcantarillado, o infiltraciones desde embalses y depósitos.

Es importante mencionar que la presente guía metodológica se centra en el análisis de las principales variables intrínsecas del medio que favorecen o limitan la recarga natural de los sistemas acuíferos y no en la implementación de técnicas asociadas a la recarga artificial de acuíferos.

4. Objetivos de la Guía

4.1 Objetivo general

Esta guía metodológica tiene como propósito orientar la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos en Colombia. Su enfoque es adaptable a distintas escalas de análisis, de acuerdo con la información oficial disponible y el conocimiento regional. Además, busca servir como base para la toma de decisiones para la priorización de estudios hidrogeológicos aplicados y para el ordenamiento ambiental del territorio.

4.2 Objetivos específicos

- Definir las variables clave y establecer criterios para asignarles factores de relevancia, determinantes en la identificación de zonas de recarga de acuíferos.
- Presentar una hoja de ruta y un manual de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la implementación de la metodología propuesta.
- Proponer métodos isotópicos e hidrogeoquímicos complementarios para la identificación de las zonas de recarga.

5. Alcance de la Guía

Esta guía es una herramienta metodológica diseñada para la identificación de zonas con potencial de recarga hídrica de acuíferos a nivel regional. La guía Está dirigida principalmente a las autoridades ambientales, no obstante, conforme lo establecido por las normas pertinentes, podrá ser usada por otros actores públicos o privados.

La metodología presentada es adaptable a diversas escalas, permitiendo su aplicación en diferentes contextos según las necesidades específicas de cada región. Asimismo, se requiere que todas las variables se trabajen bajo una misma escala de análisis, con el fin de garantizar la coherencia y comparabilidad de los resultados. Además, facilita la generación de información de referencia para fortalecer el conocimiento sobre las zonas de recarga hídrica y contribuir a la protección de los recursos hídricos.

La implementación de esta metodología permite delimitar o identificar aquellos espacios geográficos que, de acuerdo con sus características biofísicas (definidas por las variables presentadas en la guía), favorecen o limitan la infiltración, punto de partida del proceso de recarga, mas no su cuantificación. Solo si el alcance incluyera la cuantificación de la recarga, sería necesario incorporar datos de precipitación.

Dado su carácter flexible, la guía puede integrarse con información más detallada cuando esté disponible para todas las variables, promoviendo un enfoque integral para la gestión sostenible de las aguas subterráneas y la conservación de los acuíferos en Colombia.

6. Antecedentes para definición de la metodología

Para el análisis de metodologías existentes, se realizó una recopilación de referencias bibliográficas a nivel nacional e internacional, las cuales se presentan en la Tabla 2. Una de las principales conclusiones de este estudio es que no existe una metodología única o un estándar universalmente aceptado; cada autor desarrolla su propio enfoque metodológico, ajustándolo a las condiciones geológicas e hidrogeológicas de la zona de estudio.

Sin embargo, se identificó un elemento común en los estudios analizados: las variables consideradas en la evaluación se procesan mediante un SIG. Además, la asignación de pesos a cada variable depende del criterio de cada autor, con el objetivo de representar de manera precisa las condiciones específicas del área de interés.

Tabla 2 Resumen abreviado de artículos analizados

Artículo/ Metodología	Variables utilizadas	Autores	País/Año
Ground-water recharge potential mapping in Kent and Sussex Counties, Delaware.	Litología, espesor, capa de recarga y capa de recurso.	A. Scott Andres.	University of Delaware Newark, Delaware, 1991.
New Jersey Geological Survey Recharge Method GSR-32.	Uso del suelo, cobertura, suelo, nivel freático y humedales.	Emmanuel G. Charles, Cyrus Behroopi, Jack Schooley, Jeffrey L. Hoffman.	New Jersey, 1993.
A new approach to delineate the groundwater recharge zone in hard rock terrain.	Geología, nivel freático y precipitación.	N. C. Mondal, V. S. Singh.	India, 2004.
A new approach to delineate the groundwater recharge zone in hard rock terrain.	Geología, nivel freático y precipitación.	N. C. Mondal, V. S. Singh.	India, 2004.
APLIS	Altitud, pendiente, litología, infiltración-absorción preferencial y suelos.	J.A. López-Geta, B. Andreo, J. Vías, J.J. Durán, F.	España, 2004.

Artículo/ Metodología	Variables utilizadas	Autores	País/Año
		Carrasco y P. Jiménez.	
Modelo hidrogeológico de una zona de montaña en medios fracturados. Envigado, Antioquia (Colombia).	Geología, geomorfología, análisis estructural de drenajes, distribución de las cenizas, mapa hidrogeológico y pendiente.	Andrés Botero, Juan Pablo Vélez, María V. Vélez O., Humberto Caballero A., Juan Fernando Berrío, 2005.	Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 2005.
"Groundwater recharge estimation using chloride mass balance dry creek experimental watershed".	Balance de cloruros.	Pamella Sarah Aishlin.	Boise, Estados Unidos, 2006.
Identificación de Las Áreas de Recarga Acuífera y Zonas de Protección de Los Manantiales del Cantón Central de Cartago.	Mapa de tenencia de la tierra y mapa de uso de suelo.	Guzmán Monge, Ana y Díaz Hernández, Arnulfo.	Costa Rica, 2007.
Determinación de La Recarga Con Isótopos Ambientales En Los Acuíferos de Santa Fe De Antioquia.	Isótopos.	María Victoria Vélez O. & Remberto Luis Rhenals G.	Medellín, Colombia, 2008.
GIS for the assessment of the groundwater recharge potential zone.	Litología, uso del suelo, lineamientos, drenaje y pendiente.	Hsin-Fu Yeh, Cheng-Haw Lee, Kuo-Chin Hsu Po-Hsun Chang.	Taiwan, 2008.
Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica. Aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua.	Pendiente y microrrelieve, tipo de suelo (textura), tipo de roca, cobertura vegetal y uso del suelo.	Oscar Matus, Jorge Faustino, Francisco Jiménez.	Costa Rica, 2009.
Geospatial mapping of potential recharge zones in parts of Pune City	Pendiente, uso – cobertura del suelo, geomorfología, geología, escorrentía, densidad de pozos,	Raymond A, Duraiswami DV, Shetty V.	Journal Geological

Artículo/ Metodología	Variables utilizadas	Autores	País/Año
	calidad del agua (conductividad eléctrica) y nivel del agua (verano).		Society of India 2009.
Identificación y Caracterización de las Zonas con mayor Potencial de Recarga Hídrica en las Subcuencas de los Ríos Tacó y Shusho, municipio de Chiquimula.	Pendiente, tipo de suelo, tipo de roca, cobertura vegetal y uso de suelo.	Marlon Leonel Bueso Campos, Guatemala 2010.	Guatemala, 2010.
Propuesta de una metodología para la estimación de áreas de recarga hídrica en Guatemala.	Mapa de recarga hídrica, geomorfología y uso actual de la tierra.	Isaac Rodolfo Herrera Ibáñez y Oscar Brown Manrique.	Guatemala, 2011.
Delineating groundwater potential zones in Thuringapuram watershed using geospatial techniques.	Geología, suelos, drenaje, lineamientos, geomorfología y suelo.	M. Kavitha Mayilvaganan, P. Mohana, Naidu.	India, 2011.
Demarcation of prospective groundwater recharge zones in hard rock area from Southern India.	Geomorfología, geología, grupo del suelo hidrológico, pendiente, profundidad de la zona erosionada, profundidad del basamento, escorrentía, nivel del agua, el uso del suelo, densidad de drenaje, densidad de lineamiento, calidad del agua y precipitación.	Nepal C. Mondal, Vijay P. Singh, and Somayaji Sankaran.	Texas, Estados Unidos, 2011.
Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: centro-sur de la Mesa Central, México	Definición de zonas de recarga y descarga, suelo, vegetación, elevación topográfica, litología, profundidad al nivel freático, presencia/ausencia de manantiales y cuerpos de agua.	Liliana A. Peñuela Arévalo, J. Joel Carrillo Rivera.	México, 2012.
Páramos Colombianos frente al Cambio Climático: Calidad y sostenibilidad de los	Geología, geomorfología, densidad de lineamientos, densidad de drenaje e índice topográfico de humedad.	Fierro, J., Quintero, E., <i>et al.</i> EAB-UNAL.	Bogotá - Colombia, 2013.

Artículo/ Metodología	Variables utilizadas	Autores	País/Año
suelos y agua potable para Bogotá.			
Metodología para diagnóstico rápido de áreas de recarga de acuíferos.	Vegetación en el área de recarga, inclinación, suelo, rocas, tipología de recarga y descarga, uso del suelo, técnicas para el suelo y conservación del agua, fuentes de contaminación, distancia de la fuente de contaminación a el punto de descarga, posición topográfica, de la fuente de contaminación, transmisión en el suelo, transmisión del acuífero, procesos erosivos, agradación del material del río, vegetación cercana al punto de descarga, técnicas del suelo y conservación del agua.	Vitor Vieira Vasconcelos, Paulo Pereira Martins Junior, Renato Moreira Hadad.	Belo Horizonte, Brasil, 2013.
Determinación de La Recarga Acuífera Potencial Mediante Un Sistema de Información Geográfica Para La Cuenca del Río Frío, Costa.	Información meteorológica, propiedades del terreno y características hidrológicas de los suelos.	Pablo Ramírez Granados.	Costa Rica, 2013.
Application Of Gis In validating groundwater recharge zone using oxygen isotope.	Isótopo O 18, geología, suelo, pendiente y densidad de drenaje.	Dabral S, Sharma N, Bhatt B, Joshi J.P.	Gujarat, India, 2013.
'Delineation of recharge zone in Vamanapuram river basin.	Geomorfología. geología, uso del suelo, densidad de drenaje, pendiente suelo y transmisividad del acuífero.	Ranjana V K, Sindhu G, 2014.	India, College of Engineering, Trivandrum.
Identification of groundwater recharge potential zones for a watershed using remote sensing and GIS.	Pendiente, geomorfología, suelos, cobertura, densidad de drenaje y densidad de lineamientos.	Shivaji Govind Patil, Nitin Mahadeo Mohite.	Shivajinagar, Pune. India, 2014
Ecologically significant groundwater recharge area assessment for the Oro North, Oro South,	Modelo conceptual, modelo matemático y trazadores.	Lake Simcoe Region Conservation Authority.	Toronto Ontario, 2014.

Artículo/ Metodología	Variables utilizadas	Autores	País/Año
and Hawkestone Creeks subwatersheds			
Groundwater recharge zones mapping using GIS: a case study in Southern part of Jordan Valley, Jordan.	Pendiente, uso del suelo, geomorfología, geología, disponibilidad de la escorrentía, densidad de pozos, conductividad eléctrica y profundidad del agua subterránea.	Nezar Hammouri, Hani Al-Amoush, Marwan Al-Raggad, Sura Harahsheh.	Arabia Saudita. Saudi Society for Geosciences, 2014.
ESGRA A methodology for identifying ecologically significant groundwater recharge areas.	Modelo conceptual, modelo matemático y trazadores.	Mason Marchildon, Peter John Thompson, Shelly Cuddy, E.J. Wexler, Katie Howson & J.D.C. Kassenaar.	Canadá, 2015.
SALDIT New indicator-based method SALDIT for delineation of natural groundwater recharge area.	Pendiente del terreno, rendimiento específico del acuífero, cobertura de tierras y suelos, profundidad de la tabla de agua subterránea, Influencia de la geología de superficie y características topográficas del lugar.	A.G. Chachadi.	India, 2015.
An approach to delineate groundwater recharge potential sites in Ambalantota, Sri Lanka using GIS techniques.	Uso de la precipitación, densidad de lineamiento, pendiente, densidad de drenaje, uso del suelo/cobertura de la tierra, litología, geomorfología y las capas de tipo de suelo.	I.P. Senanayake, D.M.D.O.K. Dissanayake, B.B. Mayadunna, W.L. Weerasekera.	Sri Lanka, 2015.
Mapping groundwater recharge potential zone using a GIS approach in Hualian River, Taiwan.	Litología, uso del suelo /cobertura, lineamientos, drenaje y pendiente.	Hsin-Fu Yeh, Youg-Sin Cheng, Hung-I. Lin, Cheng-Haw Lee.	Taiwan, 2016.
Identification of ground water recharge potential zone for watershed using gis and remote sensing	Geomorfología, suelos, uso del suelo-cobertura, pendiente, litología y lineamientos.	H.D.Bhave, Y.B.Katpatal, A.M.Pophare.	India, 2019.
SGRA	Geología superficial, cobertura de tierra, (HRUs unidades de	Lake Simcoe Region	Toronto Ontario.

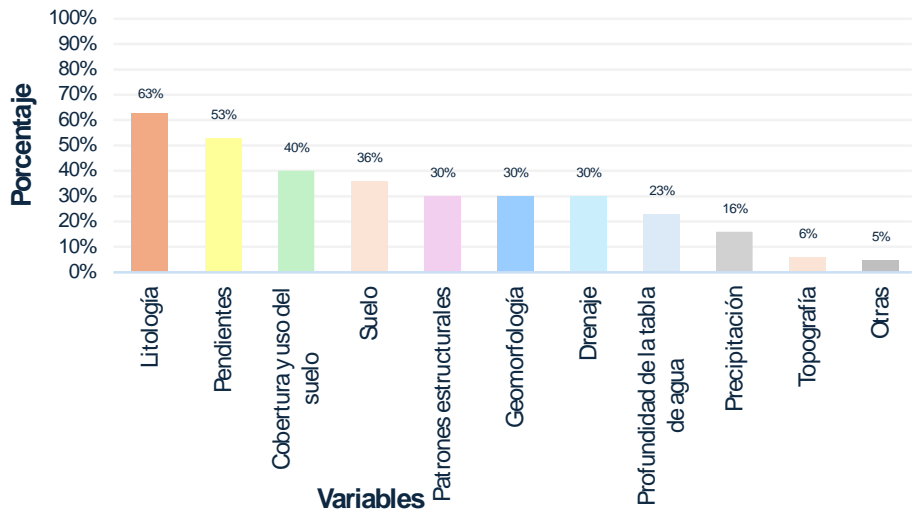
Artículo/ Metodología	Variables utilizadas	Autores	País/Año
	respuesta hidrogeológica) y valores de recarga.	Conservation Authority.	
Metodología de los autores.	Isótopos de oxígeno, isótopos de carbono, isótopos de hidrógeno, oxígeno 18, cloruro, carbono 14, nitrato y bromuro.	María Victoria Vélez Otálvaro.	Medellín, Colombia.

Durante la revisión bibliográfica, se identificaron aproximadamente 21 variables utilizadas en diversas metodologías para la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos. Estas incluyen: altitud, pendiente, topografía, geomorfología, drenaje, litología/geología de superficie, patrones estructurales/lineamientos, zonas de infiltración preferente, manantiales, tipo de suelo, cobertura y uso del suelo, precipitación media anual, profundidad del basamento, profundidad de la tabla de agua, rendimiento específico, escurrimiento, transmisividad del acuífero, conductividad eléctrica y presencia de manantiales.

Entre estas variables, las más frecuentemente empleadas en los estudios revisados fueron, en orden de importancia:

- Litología (63 %)
- Pendiente (53 %)
- Cobertura y uso del suelo (40 %)
- Tipo de suelo (36 %)
- Geomorfología (30 %)
- Patrones estructurales (30 %)
- Drenaje (30 %)
- Profundidad de la tabla de agua (23 %)
- Precipitación (16 %), especialmente en metodologías que, además de la identificación de las zonas de recarga, incluyen la cuantificación del volumen de recarga.
- Topografía (6 %)
- Las demás variables presentaron un uso inferior al 5 %. (Figura 5).

Figura 5 Características de uso común en las referencias consultadas



7. Descripción de componentes, subcomponentes y variables empleados en la metodología

A partir de la revisión y análisis de metodologías y estudios previos (tabla 2) utilizados para la identificación de zonas de recarga de acuíferos a nivel nacional e internacional, se seleccionaron las principales variables que intervienen en los procesos de recarga.

Estas variables fueron organizadas en dos componentes principales: geología y suelo, los cuales, a su vez, se subdividieron en cinco subcomponentes. De estos subcomponentes se derivan las variables utilizadas para su caracterización y análisis.

Tabla 3 Componentes, subcomponentes y variables empleados en la propuesta metodológica

Componente	Subcomponente	Variables
Suelo	Cobertura de la tierra.	Tipo de cobertura de la tierra.
	Relieve.	Densidad de drenaje.

Componente	Subcomponente	Variables
		Índice topográfico de humedad.
	Suelos.	Grupo textural (GT).
		Drenaje natural del suelo (DN).
Geología	Litología.	Tipo de roca o sedimento y características texturales-
	Incidencia estructural.	Densidad de lineamientos por unidad de área (ponderación por tipo de lineamiento y tipo de falla).

Cada variable perteneciente a los cinco subcomponentes de la metodología propuesta fue analizada de manera independiente, considerando su grado de influencia en los procesos de recarga. Con base en esta influencia, se le asignó un valor específico en una escala de 1 a 5, donde un valor más alto indica condiciones más favorables para la recarga del acuífero.

En la tabla 4 se presentan los rangos definidos para la asignación de calificación a cada variable, categorizados en: muy baja (1), baja (2), moderada (3), alta (4) y muy alta (5).

Tabla 4 Calificación de cada variable

Probabilidad de recarga	Calificación
Muy baja	1
Baja	2
Moderada	3
Alta	4
Muy alta	5

A continuación, se presentan los aspectos conceptuales de los componentes, subcomponentes y variables utilizadas en la metodología propuesta, así como los valores asignados a cada variable según su contribución al proceso de recarga de acuíferos.

7.1 Componente suelo

Como se indicó en el capítulo anterior, el componente suelo agrupa tres subcomponentes: cobertura de la tierra, relieve y suelos, los cuales se describen a continuación.

7.1.1 Subcomponente cobertura de la tierra

La cobertura de la tierra se define como la capa biofísica observable sobre la superficie terrestre (Di Gregorio, 2005 citado en Ideam, 2024)). Este concepto comprende tanto las áreas ocupadas por comunidades vegetales permanentes como aquellas modificadas por actividades antrópicas u otras coberturas existentes.

Este subcomponente se incluye en la metodología debido a su influencia directa en la infiltración del agua y, por ende, en la recarga de los acuíferos. La presencia y tipo de cobertura vegetal determinan la capacidad de infiltración del suelo, según la densidad, estructura del dosel y composición de especies. En este contexto, se destacan dos efectos principales:

1. Intercepción inicial del agua: La vegetación intercepta parte de la precipitación antes de que esta alcance el suelo, reduciendo la energía cinética de las gotas de lluvia (intensidad de impacto) y protegiendo la superficie frente a la erosión.

El agua interceptada puede (Cerrón et al., 2019; Béjar-Pulido et al., 2018; Yáñez-Díaz, 2014):

- Quedar retenida temporalmente en hojas, ramas o tallos y posteriormente evaporarse (pérdida por intercepción).
- Escurrir por el tallo de las plantas hasta el suelo (flujo caulinar o cortical).
- Atravesar el dosel y alcanzar el suelo en forma de precipitación neta, ya sea goteando entre las hojas o cayendo por los espacios entre las copas de los árboles.

2. Retención de humedad y regulación de la infiltración

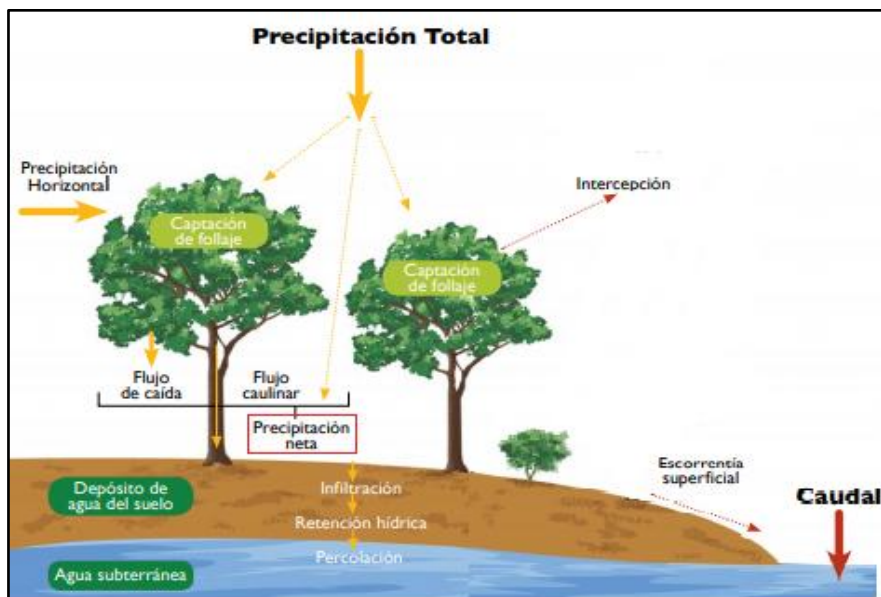
- Las cubiertas de restos vegetales y materia orgánica contribuyen a mantener la humedad del suelo, retrasando el punto de saturación y favoreciendo la absorción de agua.
- Los sistemas radiculares y la materia orgánica incrementan la porosidad del suelo, mejorando su permeabilidad y facilitando la infiltración (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico de España, 2008).

Además, la vegetación influye en los patrones de evapotranspiración, lo que puede afectar la cantidad de agua disponible para los procesos de recarga subterránea.

En el caso de áreas desprovistas de cobertura vegetal, el comportamiento del agua al entrar en contacto con el suelo depende de sus características físicas y geológicas. En general, pueden presentarse dos escenarios:

- Infiltración en el suelo o roca, con escorrentía superficial mínima, cuando existen condiciones favorables de permeabilidad.
- Escorrentía superficial predominante, sin infiltración significativa, en suelos compactados, de granulometría fina o con estructuras geológicas subyacentes poco permeables.

Figura 6 Movimiento del agua a través de la cobertura vegetal y su llegada al suelo



Nota. Figura adaptada de Cerrón *et al.* (2019).

7.1.1.1 Descripción de la variable cobertura de la tierra

Esta variable se basa en el Mapa de Cobertura de la Tierra de Colombia, a escala 1:100.000, empleando una nomenclatura jerárquica hasta el tercer nivel, de acuerdo con los requerimientos específicos de la metodología. No obstante, el nivel de detalle aplicado dependerá de la resolución espacial de las imágenes satelitales disponibles, las condiciones ambientales de cada región del país y las necesidades particulares de los usuarios.

Para escalas más detalladas, será imprescindible la realización de trabajo de campo, dado que la precisión requerida podría superar las capacidades de las imágenes satelitales. El trabajo en terreno permitirá verificar, ajustar y complementar la información obtenida a partir de estas imágenes.

El principal insumo para esta variable es el Mapa de Cobertura de la Tierra a escala 1:100.000, cuya versión más reciente corresponde al año 2020. Dado que este mapa está en constante actualización, se recomienda utilizar siempre la versión más reciente disponible.

Para acceder a la información actualizada sobre las Coberturas de la Tierra a nivel nacional, puede consultar el siguiente enlace:

<https://storymaps.arcgis.com/stories/6b45024fb7a247219c33adc524345589>

7.1.1.1.1 Método para la calificación de la variable Cobertura

En la Tabla 5 se muestran las categorías definidas, así como su calificación respecto a la probabilidad de recarga.

Tabla 5 Clasificación de Cobertura y uso del suelo

Cobertura y/o uso de suelo		Probabilidad de recarga	Calificación
Zonas urbanizadas	Tejido urbano continuo	Muy baja	1
	Tejido urbano discontinuo	Baja	2
Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación	Zonas industriales o comerciales	Muy baja	1
	Red vial, ferroviaria y terrenos asociados		
	Zonas portuarias		
	Aeropuertos		
	Obras hidráulicas		
Zonas de extracción minera y escombreras	Zonas de extracción minera	Muy baja	1
	Zonas de disposición de residuos	Muy alta (*)	5
Zonas verdes artificializadas, no agrícolas	Zonas verdes urbanas	Moderada	3
	Instalaciones recreativas	Baja	2
Cultivos transitorios	Otros cultivos transitorios	Moderada	3
	Cereales		
	Oleaginosas y leguminosas		
	Hortalizas		
	Tubérculos		
Cultivos permanentes	Cultivos permanentes herbáceos	Alta	4
	Cultivos permanentes arbustivos		

Cobertura y/o uso de suelo		Probabilidad de recarga	Calificación
Pastos	Cultivos permanentes arbóreos	Baja	2
	Cultivos agroforestales		
	Cultivos confinados		
	Pastos limpios	Moderada	3
	Pastos arbolados	Alta	4
Áreas agrícolas heterogéneas	Pastos enmalezados		
	Mosaico de cultivos	Moderada	3
	Mosaico de pastos y cultivos		
	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Alta	4
	Mosaico de pastos con espacios naturales		
	Mosaico de cultivos y espacios naturales		
Bosque	Bosque denso	Muy alta	5
	Bosque abierto		
	Bosque fragmentado		
	Bosque de galería y ripario		
	Plantación forestal	Alta	4
Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	Herbazal	Alta	4
	Arbustal		
	Vegetación secundaria o en transición		
Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	Zonas arenosas naturales	Muy alta	5
	Afloramientos rocosos	Muy baja	1
	Tierras desnudas y degradadas	Muy baja	1
	Zonas quemadas	Moderada	3
	Zonas glaciares y nivales	Alta	4
Áreas húmedas continentales	Zonas Pantanosas	Muy alta	5
	Turberas		
	Vegetación acuática sobre cuerpos de agua		
Áreas húmedas costeras	Pantanos costeros	Muy alta	5
	Salitral		
	Playones de bajamar		
Aguas continentales	Ríos (50 m)	Muy alta	5

Cobertura y/o uso de suelo		Probabilidad de recarga	Calificación
	Lagunas, lagos y ciénagas naturales		
	Canales	Muy alta **	5
	Cuerpos de agua artificiales	Muy alta ***	5
Aguas marítimas	Lagunas costeras	Muy alta	5

Para ciertos casos, la clasificación previamente presentada puede ajustarse con base en un conocimiento más detallado del polígono analizado. Se deben considerar casos específicos que permitan una mayor precisión en la caracterización de cada unidad, tales como:

* **Escombreras, vertederos, rellenos sanitarios y otros sitios similares:** la asignación de una calificación es compleja debido a la dificultad de conocer las particularidades de la adecuación de estas unidades. Dado su potencial impacto en los procesos de infiltración, se recomienda asignar inicialmente un valor de **5**. Sin embargo, el usuario de esta guía deberá contar con información adicional sobre aspectos como prácticas de construcción y configuración del sitio para afinar este valor.

** **Canales:** se sugiere una calificación de muy alta, considerando que, en la mayoría de los casos, estas estructuras no están revestidas. No obstante, si se dispone de información detallada sobre sus características constructivas, como la presencia de revestimiento o impermeabilización, el peso asignado podrá ajustarse en consecuencia.

*** **Cuerpos de agua artificiales:** se asigna una calificación muy alta, aunque debe evaluarse su interacción con el terreno, es decir, si existe conexión o intercambio de agua con el lecho o fondo. En el caso de estanques para acuicultura y lagunas de oxidación, la calificación dependerá de las condiciones de diseño y construcción de estas estructuras.

7.1.1.1.2 Verificación en campo de la variable cobertura de la tierra

Las consideraciones para la verificación en campo establecidas en esta guía están basadas en la memoria técnica del Mapa de Coberturas 2018 a escala 1:100.000 y pueden ser de utilidad para los usuarios en la verificación de información en terreno (Castellanos et al., 2021).

La verificación de dudas temáticas forma parte del control de calidad y se lleva a cabo de manera simultánea con la producción del mapa. Dada su relevancia, se ha considerado necesario describir este proceso en un apartado específico. Esta verificación se realizó para resolver inconsistencias o incertidumbres surgidas durante la interpretación o reinterpretación de la cobertura de la tierra, mediante dos estrategias principales:

1. Análisis de imágenes satelitales de media y alta resolución.
2. Verificación en campo.

1. Verificación mediante imágenes satelitales

Para la primera estrategia, se utilizaron imágenes de alta resolución espacial Planet Scope (menor a 5 metros), correspondientes al periodo 2018, obtenidas a través de la plataforma SEPAL (Sistema para Observaciones de la Tierra, Acceso a Datos, Procesamiento y Análisis para el Monitoreo de la Tierra) de la FAO y de la iniciativa NICFI del Gobierno de Noruega.

Adicionalmente, se emplearon mosaicos de medianas generados a partir del sensor Sentinel-2, proporcionados por el SMByC del IDEAM, junto con otros geoservicios de visualización de imágenes satelitales, tales como:

- Open Bing Map Aerial
- ArcGIS Aerial
- Google Map Aerial
- Basemap de ArcGIS

Los usuarios de esta guía pueden utilizar estos recursos para realizar análisis y consideraciones preliminares en oficina antes de proceder con la verificación en campo.

2. Verificación en campo

Se recomienda realizar la verificación en terreno en aquellos casos en los que persistan dudas luego del análisis en gabinete. Estas dudas suelen ser identificadas por los intérpretes y los controles de calidad durante el proceso de interpretación y reinterpretación. Para ello, se

consolidaron las dudas temáticas en un archivo único y se planificaron las visitas de campo, considerando factores como accesibilidad, condiciones sanitarias y seguridad en las áreas a verificar. En este proceso, se utilizaron los siguientes materiales y herramientas:

- Cartografía digital compatible con aplicaciones de captura de datos en campo.
- Formularios específicos diseñados para la recopilación y verificación de datos.
- Instrumentos y equipos, incluyendo computadoras portátiles, GPS, binoculares y brújulas.

Estos procedimientos y herramientas pueden aplicarse en el marco de la presente guía para la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos.

La información detallada sobre este proceso y sus resultados se encuentra en el informe Verificación de dudas temáticas en campo y con imágenes de alta resolución para la interpretación del Mapa de Coberturas de la Tierra Corine Land Cover 2018.

7.1.1.1.3 Consideraciones de la implementación de la variable cobertura a escalas detalladas

Uno de los principales retos en la implementación de la variable cobertura de la tierra a escalas más detalladas que la nacional (1:100.000) es el establecimiento de una leyenda unificada que permita la recopilación de información estandarizada en todo el país. Esta leyenda podrá ser desarrollada progresivamente a medida que la implementación de pilotos a escalas más detalladas genere espacios de discusión técnica para definir la desagregación o inclusión de nuevas categorías en los niveles 4, 5 y 6.

En este contexto, la Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra es el resultado de un proceso interinstitucional que ha permitido unificar la clasificación de las coberturas representativas del territorio nacional, así como los criterios y conceptos generales asociados. Esta clasificación se ha consolidado como un estándar de facto en Colombia y es utilizada oficialmente en numerosos procesos y trámites ambientales. Además, ha facilitado la producción ordenada, estandarizada y sistemática de la cartografía de coberturas de la tierra.

Si bien es posible realizar ajustes en la leyenda de coberturas 1:100.000, estos deben ser concertados a nivel interinstitucional. Asimismo, cualquier leyenda más detallada que se derive de la nacional debe respetar las categorías y definiciones ya establecidas.

A continuación, se presentan las principales consideraciones para la generación y aplicación de la leyenda a escalas más detalladas:

- En el documento que presente la leyenda de coberturas de la tierra a escala 1:25.000, no se debe confundir la leyenda con la metodología de interpretación de coberturas. La metodología puede variar, pero la clasificación debe ajustarse a la establecida en la leyenda.
- La transparencia y solidez científica de la leyenda nacional están respaldadas por el documento oficial: *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología Corine Land Cover, adaptada para Colombia. Escala 1:100.000*. Es importante aclarar que esta leyenda no respalda ejercicios que incorporen mayor nivel de detalle sin un consenso nacional previo.
- La obtención de las coberturas consignadas en la leyenda debe estar orientada a la recopilación de información a partir de imágenes de sensores remotos, con el propósito de generar una base de datos estandarizada. Por lo tanto, los niveles de clasificación deben estar estrictamente condicionados a lo que puede identificarse con claridad en las imágenes satelitales de la temporalidad analizada.
- El desarrollo de la leyenda de coberturas y uso de la tierra a escala 1:25.000 debe estar articulado con la Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra a escala 1:100.000. Esto implica que los parámetros ya definidos en esta adaptación metodológica macro deben ser respetados, ajustándolos a la escala y los requerimientos temáticos específicos.
- El punto de partida de este trabajo es la leyenda nacional 1:100.000, la cual constituye el estándar de facto para la clasificación de coberturas nacionales. Por lo tanto, siguiendo la directriz del IDEAM, se debe respetar la clasificación hasta el nivel tres, sin incluir, excluir o modificar los niveles uno, dos y tres de la leyenda nacional. Además, no se deben alterar las definiciones establecidas en esta.

- Se debe aclarar que ciertos niveles de clasificación no podrán determinarse sin un trabajo de campo, especialmente aquellos relacionados con el uso del suelo. Se recomienda especificar en el documento de la leyenda qué unidades requieren verificación en campo, dado que los insumos satelitales no permiten su identificación precisa.
- Las nuevas categorías incorporadas en la leyenda 1:25.000 deben ser excluyentes entre sí y con otras categorías de niveles superiores e inferiores. Esto es fundamental para evitar interpretaciones ambiguas y clasificaciones inconsistentes entre distintos profesionales o controles de calidad.
- Es esencial definir con claridad los elementos incluidos y excluidos en cada categoría para evitar confusiones en la interpretación y asignación de coberturas.
- La descripción de cada categoría en la leyenda debe basarse en características visibles en las imágenes satelitales o en datos de contexto verificables, evitando el uso de términos subjetivos o imprecisos.

7.1.2 Subcomponente relieve

Para Lugo Hubp (1988), la geomorfología se define como la ciencia que estudia el relieve terrestre. Una disciplina encargada de la descripción, génesis y clasificación de las formas del terreno (Carvajal, 2012). De manera que, la identificación de las características del relieve resulta fundamental para la identificación de zonas de recarga potencial de agua subterránea (Arulbalaji et al., 2019).

Factores como la morfología de la superficie (formas planas, cóncavas y convexas), la altura topográfica y la pendiente influyen significativamente en los procesos de infiltración y recarga hídrica. En general, los relieves escarpados están asociados con un rápido escurrimiento superficial, lo que reduce la probabilidad de infiltración y recarga. En contraste, en áreas planas y cóncavas con pendientes suaves, el proceso de infiltración y recarga hídrica se favorece, ya que permite un mayor tiempo de contacto entre el agua y la superficie (Matus et al., 2009).

La evaluación de la variable relieve se basa en metodologías ampliamente utilizadas para la identificación de zonas potenciales de recarga a través de sensores remotos y técnicas de teledetección (Arulbalaji et al., 2019; Khodaei y Nassery, 2013; Makonyo y Msabi, 2021; Maqsoom et al., 2022; Senapati y Das, 2022). Se resalta el papel crucial que juegan las características del paisaje en la localización de estas zonas.

A continuación, se presentan los principales parámetros de evaluación y su influencia en la recarga potencial de agua subterránea:

7.1.2.1 Densidad de drenaje

En los estudios hidrogeológicos, la densidad de drenaje es un parámetro fundamental para la evaluación de las características hidrogeológicas de un área. Tanto el patrón como la densidad de drenaje proporcionan información clave sobre la capacidad del terreno para infiltrar agua y su relación con la escorrentía superficial (Singhal y Gupta, 2010). En este contexto, la densidad de drenaje se considera un indicador indirecto de la recarga potencial de agua subterránea (Khodaei y Nassery, 2013).

Este parámetro está influenciado principalmente por la litología del área (Adewumi y Anifowose, 2017), ya que las características del material geológico determinan la permeabilidad y, por ende, la capacidad de infiltración del agua. En términos generales, la densidad de drenaje refleja la relación entre infiltración y escorrentía, lo que permite inferir la tasa de recarga de los acuíferos.

La relación entre escorrentía e infiltración está determinada por la permeabilidad del sustrato, que depende tanto del tipo de roca como del grado de fracturamiento presente en el terreno (Adewumi y Anifowose, 2017). Debido a esto, la densidad de drenaje se considera inversamente proporcional a la permeabilidad: áreas con baja densidad de drenaje suelen estar asociadas a terrenos altamente permeables, favorables para la recarga, mientras que zonas con alta densidad de drenaje tienden a presentar menor infiltración y, por lo tanto, menor capacidad de recarga (Arulbalaji et al., 2019).

7.1.2.2 Índice Topográfico de Humedad

El Índice Topográfico de Humedad (ITH) es un indicador clave para evaluar y cuantificar la influencia del relieve en los procesos hidrológicos. Este índice permite estimar la posible infiltración de agua subterránea inducida por la topografía (Arulbalaji et al., 2019; Senapati y Das, 2022) y se considera una herramienta efectiva para determinar la probabilidad de recarga de acuíferos (Danso y Ma, 2023).

El ITH establece una relación entre la humedad del suelo, las áreas de saturación y el flujo de acumulación de aguas subterráneas (Avand et al., 2020), proporcionando una representación espacial de las condiciones de humedad en una determinada región. Dentro de un contexto topográfico, este índice permite identificar las zonas donde el agua tiende a acumularse y moverse a lo largo de las pendientes por efecto de la gravedad (Senapati y Das, 2022).

7.1.2.3 Insumos para la valoración del relieve en el proceso de recarga

La información necesaria para el cálculo de la variable *relieve* se basa en sensores remotos y en datos cartográficos básicos. Para el cálculo del ITH, se emplean Modelos Digitales de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés), los cuales representan de manera visual y matemática las variaciones altimétricas del terreno con respecto al nivel medio del mar en la zona de estudio.

De acuerdo con la escala de trabajo de esta guía, se recomienda el uso de modelos digitales de elevación con una resolución espacial mínima de 12,5 metros y máxima de 30 x 30 metros, ese ultimo para insumos a escala 1:100.000, garantizando así un adecuado nivel de detalle en el análisis topográfico. Los archivos DEM necesarios para el cálculo del ITH pueden obtenerse de forma gratuita a través de la plataforma NASA EARTHDATA o mediante el ASF Data Search Vertex, disponible en el siguiente enlace: <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/#>. Asimismo, es posible acceder a estos datos a través de estudios multidisciplinarios generados por diversas entidades, en distintas resoluciones.

Para el cálculo de la densidad de drenaje, el insumo principal corresponde a la cartografía hidrográfica a escala 1:100.000 elaborada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi

(IGAC). En caso de contar con datos a una escala más detallada, se recomienda su utilización según los requisitos específicos del análisis. Con esta información, se debe generar un mapa de densidad de drenaje, el cual refleja la distribución estadística de los drenajes por unidad de área. Este análisis se puede realizar mediante herramientas SIG, utilizando software especializado como ArcGIS, QGIS o SAGA GIS.

7.1.2.4 Método para la calificación de la variable

A continuación, se describe la metodología para la evaluación de la variable relieve. Los procedimientos específicos y el uso de herramientas SIG aplicadas en este análisis se detallan en el Manual SIG, el cual se encuentra anexo a la presente guía metodológica.

7.1.2.4.1 Mapa de densidad de drenaje

Para evaluar la densidad de drenaje y su influencia en la recarga potencial de agua subterránea, se emplean los datos de drenaje disponibles en la cartografía básica proporcionada por el IGAC. Se recomienda utilizar información a escala 1:100.000 o una resolución más detallada, si todos los insumos disponibles lo permiten a la misma escala.

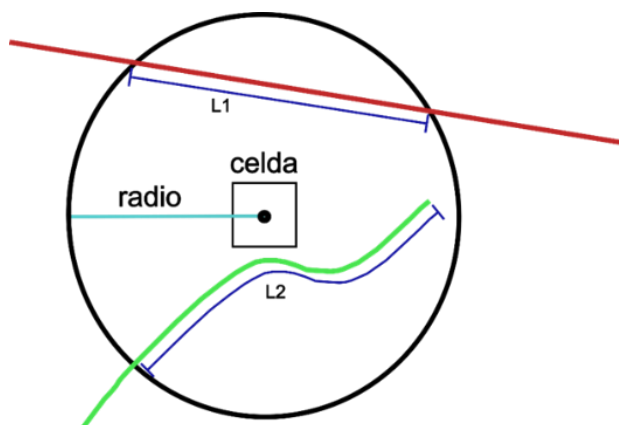
Con base en esta información, se genera un mapa de densidad de drenaje, el cual representa la distribución espacial de los drenajes por unidad de área. Para su elaboración, se emplean herramientas de análisis espacial disponibles en SIG, como ArcGIS, QGIS o SAGA. El resultado es una representación cartográfica que refleja las variaciones de la densidad de drenaje dentro del área de estudio, expresadas en km/km^2 .

El cálculo de la densidad de drenaje se realiza mediante la herramienta Line Density de ArcGIS, la cual determina la densidad de líneas dentro de un radio de búsqueda a partir del centro de cada celda, expresando el resultado en unidades de longitud por área. Esta herramienta establece un radio de búsqueda desde cada celda dentro del ráster y calcula la longitud total de las líneas de drenaje contenidas en ese radio. Luego, suma estos valores y los divide por el área del círculo definido, obteniendo la densidad en km/km^2 (Esri, sf).

Los valores obtenidos dependen del tamaño de celda y de la longitud del radio de búsqueda, el cual varía en función de los patrones de drenaje del área de estudio (

Figura 7). Por esta razón, en la aplicación de esta guía metodológica, se establece como unidad mínima de análisis las cuencas hidrográficas definidas en la zonificación hidrográfica de Colombia del IDEAM (2013).

Figura 7 Fundamento de la herramienta densidad de líneas

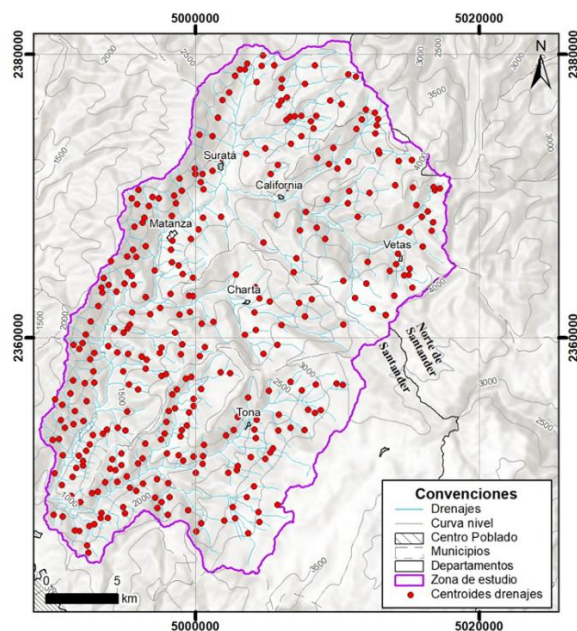


Nota. Tomado y modificado de ArcGIS Pro.

Para cada cuenca hidrográfica dentro del área de estudio, se debe determinar su densidad de drenaje, la cual depende esencialmente de la distribución espacial de los drenajes sencillos. Con el objetivo de definir una radio de búsqueda acorde con las características de la red de drenaje en cada cuenca, se debe identificar el punto central (centroide) de las líneas que representan los drenajes sencillos en la cartografía básica.

Posteriormente, se deben calcular parámetros estadísticos que caracterizan la distribución de los centroides dentro de la cuenca, obteniendo la distancia euclidiana promedio entre ellos. Este valor se utiliza como el radio de búsqueda para el cálculo de la densidad de drenaje en cada cuenca hidrográfica, garantizando así un análisis ajustado a las condiciones específicas de la red de drenaje en el área evaluada (**Figura 8**).

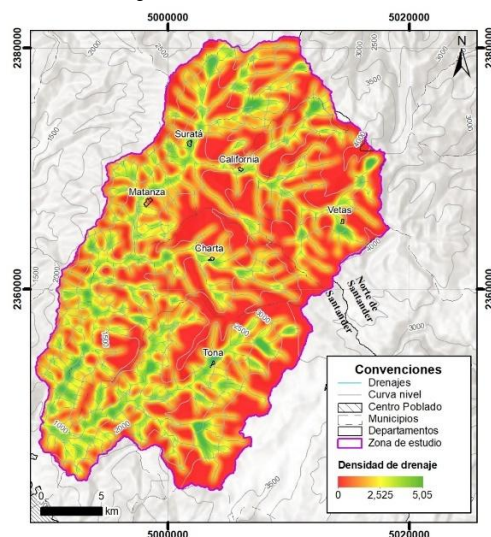
Figura 8 Mapa de centroides de los drenajes sencillos para la cuenca de los ríos Suratá y Tona



Nota. En el mapa se aprecia la distribución espacial de los drenajes dentro de la cuenca y su relación con otros factores geográficos.

Finalmente, los resultados para cada cuenca hidrográfica deben integrarse en un mosaico y recortarse según la extensión del área de estudio (**Figura 9**). Dado que la densidad de drenaje es un indicador inversamente proporcional a la permeabilidad del sustrato, se establece como premisa fundamental que una mayor densidad de drenaje implica una menor capacidad de infiltración. En contraste, valores bajos de densidad de drenaje sugieren la presencia de sustratos más permeables, lo que favorece la recarga de acuíferos.

Figura 9 Mapa de densidad de drenaje de la cuenca de los ríos Suratá y Tona



Nota. El mapa muestra la distribución de los cauces de agua dentro de la cuenca y su relación con factores geomorfológicos, hidrológicos y geológicos.

A diferencia de las demás variables consideradas en la metodología propuesta, en las cuales los valores más altos indican un mayor potencial de recarga, en el caso de la densidad de drenaje, los valores elevados se asocian con una menor capacidad de infiltración. Esto reduce la susceptibilidad del terreno a la recarga de agua subterránea. Por el contrario, los valores bajos de densidad de drenaje están relacionados con una mayor susceptibilidad a la infiltración, lo que favorece una recarga más significativa (Arulbalaji et al., 2019).

Desde el punto de vista geológico, las áreas con altas densidades de drenaje suelen presentar un bajo potencial de recarga, característica común en rocas no fracturadas y en suelos con menor porosidad y permeabilidad. En cambio, en zonas con bajas densidades de drenaje, las rocas pueden exhibir porosidad primaria y/o fracturamiento, lo que facilita el flujo de agua subterránea. Asimismo, en estas áreas, los suelos tienden a estar bien drenados (Adewumi y Anifowose, 2017).

7.1.2.4.2 Índice Topográfico de Humedad

El ITH viene definido por la siguiente fórmula:

- **Ecuación 1**

$$ITH = \ln \frac{\alpha}{\tan \beta}$$

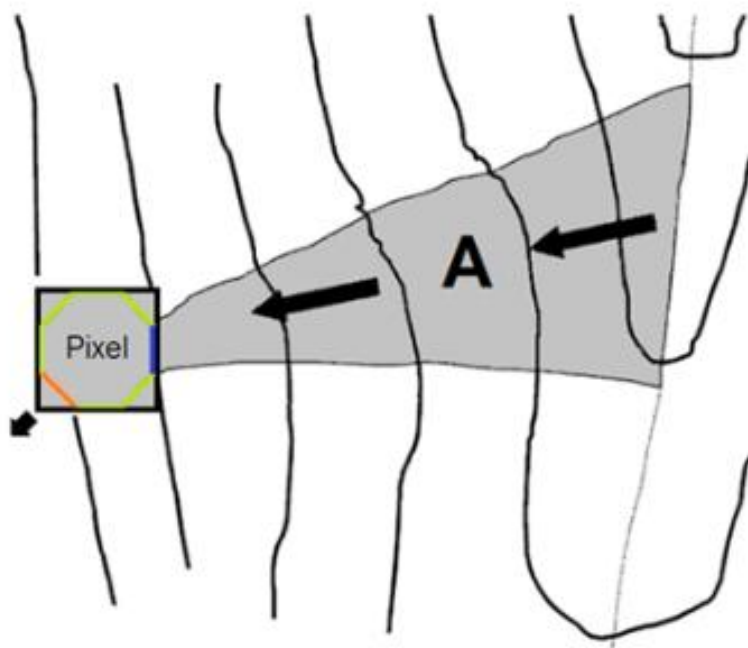
Donde:

α : representa el área de contribución o área específica de captura que es un parámetro que mide la tendencia de un área a recibir agua.

Tangente de β : es la tangente del ángulo de la pendiente (Arulbalaji et al., 2019).

Inicialmente, para la obtención del parámetro ITH, es necesario determinar la acumulación de flujo, una técnica que evalúa la capacidad del suelo para almacenar agua. Este análisis se lleva a cabo mediante algoritmos que modelan el comportamiento del agua en la superficie, utilizando Modelos Digitales de Elevación (MDE). El cálculo del flujo se realiza para cada celda, teniendo en cuenta tanto las pendientes descendentes y las formas cóncavas como las pendientes ascendentes y las formas convexas (Moreno Andrade, 2022). Este proceso se fundamenta en la topografía del terreno y en la dirección del flujo. El resultado corresponde al área de contribución o área específica de captura, la cual, en combinación con el ángulo de la pendiente para cada celda, permite finalmente calcular el ITH.

Figura 10 Ilustración del cálculo del ITH para un píxel

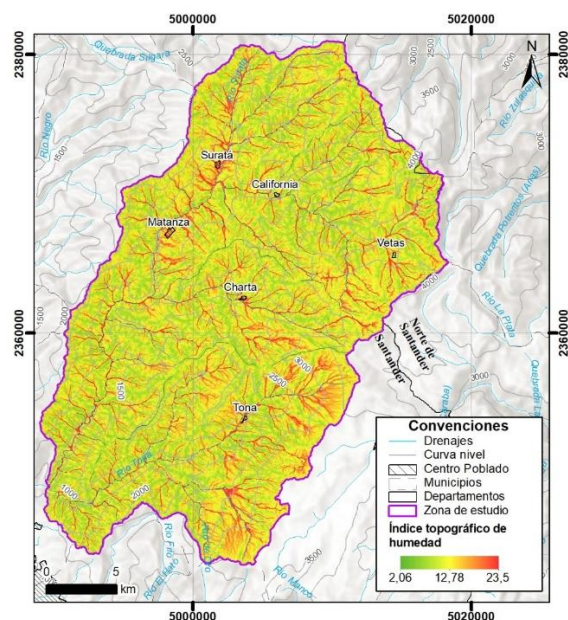


Nota. Tomada de Marthews *et al.*, (2015).

Las áreas propensas a la acumulación de agua, caracterizadas por un ángulo de pendiente bajo, están asociadas a valores altos del ITH. En contraste, las áreas secas y bien drenadas, que presentan pendientes pronunciadas, se relacionan con valores bajos de ITH (Mattivi *et al.*, 2019). A medida que el valor de este índice aumenta, también lo hace la humedad del área en función de su configuración topográfica.

Un ITH categorizado como alto corresponde a superficies en el terreno analizado que, debido a su muy baja pendiente, reciben escurrimiento de las áreas circundantes, lo que genera saturación del suelo y fomenta la formación de surcos de escorrentía. De manera similar, un ITH muy alto se asocia a las superficies más bajas y casi planas del terreno, que tienen una mayor tendencia a concentrar el escurrimiento superficial, convirtiéndose en áreas inundables (Roa Lobo & Kamp, 2012). El resultado final será un mapa con valores continuos indicando que los valores altos de ITH son las áreas más propensas a generar recarga de agua subterránea (**Figura 11**).

Figura 11 Mapa de Índice Topográfico de Humedad para las cuencas de los ríos Suratá y Tona



Nota. El mapa muestra la distribución del potencial de acumulación de agua en el terreno; con valores continuos indicando que los valores altos de ITH son las áreas más propensas a generar recarga de agua subterránea.

7.1.2.5 Verificación en campo de la variable relieve

Para los insumos a escalas 1:100.000 y 1:25.000, no es necesario realizar levantamientos en campo, ya que se utiliza información oficial generada por el IGAC, la cual incluye los drenajes simples. Los MDE para estas escalas están disponibles y se obtienen mediante técnicas de interferometría de radar.

Para escalas más detalladas, se recomienda llevar a cabo un levantamiento cartográfico mediante vuelos de drones, cumpliendo con los requisitos técnicos establecidos por el IGAC en la Resolución 471 de 2020, “por medio de la cual se establecen las especificaciones técnicas mínimas que deben tener los productos de la cartografía básica de Colombia”, y la Resolución 529 de 2020, “por medio de la cual se establecen las especificaciones técnicas mínimas que deben tener los productos de la cartografía básica oficial de Colombia”.

Estos insumos son fundamentales para generar MDT y bases de datos cartográficas con un mayor nivel de detalle, necesarios para la identificación de los drenajes presentes en la zona de estudio. Las especificaciones técnicas para escalas 1:1.000, 1:2.000, 1:5.000 y 1:10.000 incluyen resoluciones específicas para ortoimágenes, modelos digitales de elevación y características de las bases cartográficas. Los insumos requeridos para los drenajes simples se obtendrán de dichas bases cartográficas y de los modelos digitales de elevación generados mediante fotogrametría digital.

7.1.2.6 Consideraciones de la implementación de la variable relieve a escala 1:25.000

Para el cálculo de la variable relieve a escala 1:25.000, se recomienda utilizar como insumo base la cartografía básica proporcionada por el IGAC a esta misma escala. Esta información puede consultarse en la plataforma Colombia en Mapas, disponible en el siguiente enlace: <https://www.colombiainmapas.gov.co/>.

- Para el cálculo de la densidad de drenaje, se debe emplear la cartografía de drenajes sencillos proporcionada por el IGAC.
- Para el cálculo del ITH, es necesario utilizar un modelo DEM con una resolución de 12,5 metros. Los archivos DEM requeridos para este cálculo pueden descargarse de la plataforma NASA EARTHDATA, en el portal ASF Data Search Vertex, a través del siguiente enlace: <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/#>.

Para escalas más detalladas, se recomienda seguir la metodología indicada en el numeral anterior, con el fin de obtener cartografía básica con un mayor nivel de precisión, aplicando las especificaciones técnicas correspondientes. Como resultado de la cartografía básica y los modelos digitales de elevación a mayor escala, se debe utilizar la guía siguiendo los insumos establecidos para la escala de trabajo propuesta.

Estos insumos incluyen, como base, el modelo digital de elevación, el cual debe cumplir con las siguientes resoluciones:

- 0,3 metros para escala 1:1.000

- 0,6 metros para escala 1:2.000
- 1,5 metros para escala 1:5.000
- 3 metros para escala 1:10.000

Los drenajes sencillos deberán generarse conforme a la escala de trabajo definida y de acuerdo con los parámetros establecidos por el IGAC.

7.1.3 Subcomponente suelos

La infiltración en el suelo se define como el movimiento del agua a través de la matriz en su zona no saturada, ocurriendo entre los espacios porosos de las partículas que lo conforman. Para evaluar la capacidad de infiltración del suelo, se propone un indicador compuesto por dos variables que proporcionan información sobre la facilidad o dificultad que tiene el agua para atravesar la capa del suelo y recargar los acuíferos.

En la escala 1:100.000, que es la escala de aplicación de la presente metodología (debido a la disponibilidad de información para todo el territorio colombiano a través del Mapa Geopedológico, elaborado por el IGAC en 2014), la variable delimitadora para este componente es la Unidad Cartográfica del Suelo (UCS). Esta unidad contiene, entre otros datos, información sobre el grupo textural y el drenaje natural, los cuales están directamente relacionados con los procesos de infiltración. Estas variables son utilizadas para determinar el Indicador de Infiltración en el Suelo, el cual asigna un factor de ponderación a cada variable. Siendo IS el Indicador de Infiltración en el Suelo, GT el Grupo Textural y DN el Drenaje Natural, el cálculo del indicador se realiza mediante la siguiente fórmula:

- Ecuación 2: Infiltración del Suelo (ITH)

$$IS = (GT * C1) + (DN * C2)$$

Donde:

C1 y C2 son las constantes de ponderación, con valores del 40 % y 60 %, respectivamente. Estas constantes asignan mayor relevancia a una de las variables, en este caso, al Drenaje Natural (DN), lo cual se justifica por su influencia directa en los procesos de infiltración y recarga de acuíferos.

7.1.3.1 Grupo Textural (GT)

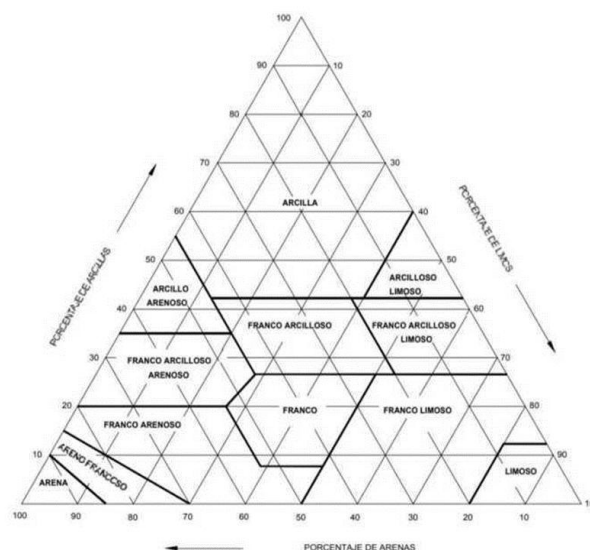
La textura del suelo se define como la distribución proporcional del tamaño de las partículas que lo componen, principalmente arcilla, limo y arena (Zinck, 2012). Según esta clasificación:

- Las arcillas corresponden a partículas con un tamaño menor a 0,002 mm.
- El limo abarca partículas con un tamaño entre 0,002 mm y 0,05 mm.
- La arena incluye partículas con un tamaño entre 0,05 mm y 2 mm.

Estas características están directamente relacionadas con propiedades fundamentales para el movimiento del agua en el suelo, como la aireación, la retención y almacenamiento de agua, la permeabilidad y la velocidad de infiltración (Jaramillo, 2002).

Una herramienta clave para clasificar las clases texturales es el diagrama textural del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA, por sus siglas en inglés). Este diagrama permite determinar la clase textural de un suelo en función de los porcentajes de arena, limo y arcilla presentes (Soil Survey Staff & USDA, 2014) (**Figura 12**).

Figura 12 Diagrama de clases texturales del suelo



Nota. Tomada de Soil Survey Staff & USDA (2014).

Considerando la gran variabilidad debido a la heterogeneidad del suelo para la escala de trabajo propuesta (1:100,000) y a la existencia para todo el territorio se escoge la variable de grupo textural, que agrupa las clases texturales, como se observa en la **Tabla 6**.

Tabla 6 Grupos texturales a partir de clases texturales

GRUPO	CLASE	CGO	GRUPO	CLASE	CGO
GR- Texturas gruesas	Arenosa	A	ME: texturas medias	Franco arenosa muy fina	FAmf
	Arenosa muy gruesa	Amg		Franca	F
	Arenosa gruesa	Ag		Franco limosa	FL
	Arenosa media	Am		Limosa	L
	Arenosa fina	Af	MF-Texturas moderadamente finas	Franco arcillosa	FAR
	Arenosa muy fina	Amf		Franco arcillo arenosa	FARa
	Arenosa franca gruesa	AFg		Franco arcillo limosa	FARL
	Arenosa franca	AF	FI-Texturas finas	Arcillo arenosa	ArA
	Arenosa franca fina	AFF		Arcillo limosa	ArL
	Arenosa francamuy fina	AFmf		Arcillosa	Ar
MG-Texturas moderadamente gruesas	Franco arenosa gruesa	FAG		Arcillosa fina	Arf
	Franco arenosa	FA	FF-Texturas muy finas	Arcillosa muy fina	ArmF
	Franco arenosa fina	Faf			

Nota. Tomado de IGAC, (2014a).

Para Colombia, se cuenta con el Mapa Geopedológico elaborado por el IGAC en el año 2014, el cual ofrece una clasificación más detallada y precisa de los grupos texturales en comparación con la presentada en la tabla anterior. Esta clasificación se aplica a cada una de las Unidades Cartográficas de Suelos (UCS) e incluye las siguientes categorías:

- Fina
- Fina y gruesa
- Fina y media
- Fina y orgánica
- Gruesa

- Gruesa y fina
- Gruesa y media
- Gruesa y orgánica
- Media
- Media y fina
- Media y gruesa
- Orgánica
- Orgánica y fina

Considerando la clasificación establecida en el Mapa Geopedológico, en la **tabla 7**, se define un valor asociado con la probabilidad de infiltración para la recarga de acuíferos. Este valor se determina con base en las características descritas para cada grupo textural.

Tabla 7 Clasificación de grupos texturales

Grupo textural	Probabilidad de infiltración	Calificación	Descripción
Gruesa	Muy alta	5	La textura gruesa del suelo, como la arena, es altamente porosa y tiene una baja densidad. Esto permite que el agua se infiltre fácil y rápidamente en el subsuelo, lo que hace que los suelos de textura gruesa sean muy efectivos para recargar acuíferos. Además, la arena tiene una buena permeabilidad, lo que permite que el agua se filtre profundamente en el suelo.
Orgánica	Alta	4	La textura orgánica del suelo, como la turba, es muy porosa y tiene una alta capacidad de retener agua. Por lo tanto, los suelos orgánicos tienen una alta capacidad de recarga de acuíferos. La turba también es muy permeable, lo que permite que el agua se infiltre rápidamente en el suelo.
Media	Moderada	3	La textura media del suelo, como el limo, tiene una porosidad y densidad intermedias. Por lo tanto, el suelo de textura media tiene una capacidad de recarga de acuíferos intermedia. El limo tiene una capacidad moderada para retener agua, lo que permite que el agua se filtre lentamente hacia el subsuelo.

Grupo textural	Probabilidad de infiltración	Calificación	Descripción
Fina	Baja	2	La textura fina del suelo, como la arcilla, puede limitar la infiltración de agua debido a su baja macroporosidad y alta densidad. Como resultado, la capacidad de recarga de acuíferos de los suelos con textura fina suele ser menor que la de otros tipos de suelos. Además, la arcilla es propensa a la compactación, lo que también puede limitar la capacidad de infiltración del agua.
No suelo*: zonas urbanas, aeropuerto, base militar, basurero, cantera, edificación, fosa mina carbón, tierra, relaves, carbón, saladares, No aplica	Muy baja	1	Estas coberturas de “No suelos” tienen una menor probabilidad de recarga de acuíferos debido a que están compuestas por superficies impermeables o con baja permeabilidad, lo que dificulta o impide la infiltración de agua en el suelo.
No suelo*: cuerpos de agua, represa, nieve perpetua, misceláneo erosionado, misceláneo rocoso	Muy alta	5	Estas coberturas de No suelos tienen una mayor probabilidad de recarga de acuíferos debido a que la nieve perpetua puede derretirse y filtrarse en el suelo, mientras que las coberturas misceláneo erosionado y misceláneo rocoso pueden permitir cierta infiltración de agua en función de las características específicas del relieve.

Nota. Las características de “No suelos” no corresponden a grupos texturales, no obstante, son atributos que se pueden encontrar en las unidades cartográfica de suelos UCS y deben ser calificados para aplicar la ecuación.

Teniendo en cuenta que la variable delimitadora es la (UCS) y que, dentro de esta, puede existir más de un tipo de suelo, así como varios grupos texturales asociados, se recomienda considerar otro atributo del Mapa Geopedológico denominado “Porcentaje”. Este atributo

proporciona información sobre la probabilidad de encontrar un tipo de suelo modal con características específicas asociadas.

- Si el valor del atributo “Porcentaje” es mayor o igual a 60, se selecciona el primer grupo textural y se asigna directamente el valor propuesto en la **Tabla 7**.
- Si el valor es menor a 60, se toma la información de los dos primeros grupos texturales, se asignan los valores correspondientes según la **Tabla 7** y se promedian.

Ahora bien, si se presenta la información que se observa en la **Tabla 8**, el cálculo se realizaría de la siguiente manera:

Tabla 8 Ejemplo de tabla de atributos del mapa de Geopedología

Mapa_Geopedologico_11092014— Objetos Totales: 72903, Filtrado: 72903, Seleccionados: 0							
TERIAL_P	SUBGRUPO	PERFILES	PORCENTAJE	TEXTURA	DRENAJE	HUMEDAD	
28114	Muviales	Aeric Flavaquents, Aquic ...	NS97, PC026, PC043	60, 25, 15	Media y fina	Pobre y bueno	Ácrico y údico
28115	Muviales	Aeric Flavaquents, Aquic ...	NS97, PC026, PC043	60, 25, 15	Media y fina	Pobre y bueno	Ácrico y údico
28116	Muviales	Aeric Flavaquents, Aquic ...	NS97, PC026, PC043	60, 25, 15	Media y fina	Pobre y bueno	Ácrico y údico
28117	Muviales mixtos	Vertic Endoaquepts, Fluve...	UN306, UN110, PB67	60, 25, 15	Fina	Pobre	Ácrico y údico
28118	Muviales mixtos	Vertic Endoaquepts, Fluve...	UN306, UN110, PB67	60, 25, 15	Fina	Pobre	Ácrico y údico
28119	Muviales mixtos	Vertic Endoaquepts, Fluve...	UN306, UN110, PB67	60, 25, 15	Fina	Pobre	Ácrico y údico

Nota. Tomado del IGAC (2014)

Para la UCS que se encuentra en la primera fila, se tiene un porcentaje igual a 60. Por lo tanto, el valor del grupo textural o textura no debe ser promediado. En este caso, se toma la primera característica de este atributo, que corresponde a una textura media. Según la **tabla 8**, esta textura tomaría un valor de 3.

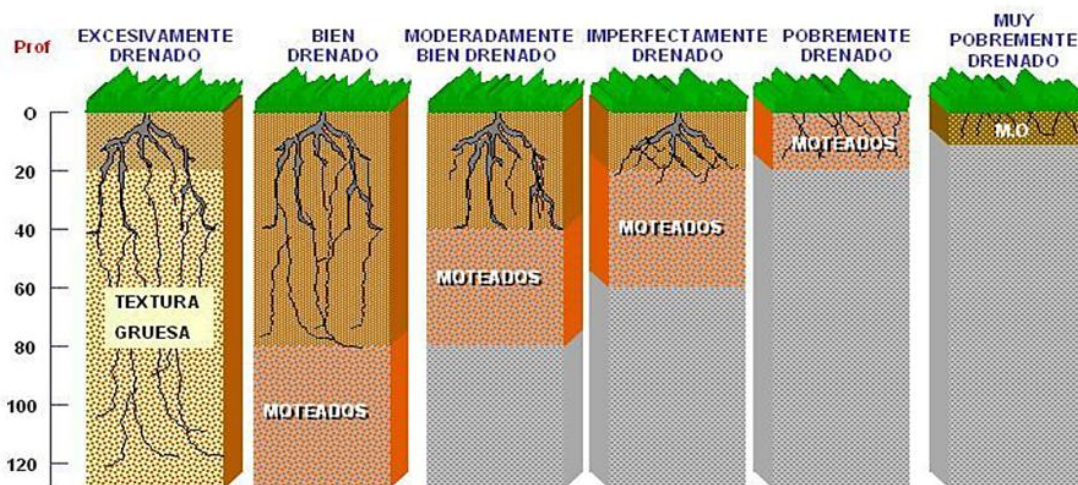
7.1.3.2 Drenaje natural (DN)

Esta variable es el resultado del análisis de dos componentes principales:

- Drenaje interno: depende de las características intrínsecas del suelo, como la textura, la estructura, la densidad y otras propiedades.
- Drenaje externo: está influenciado por las condiciones topográficas, como la pendiente y la geomorfología de la zona.

Según el IGAC (2014a), el drenaje natural del suelo se define como la rapidez y el grado con que el suelo se satura total o parcialmente con agua, debido al escurrimiento superficial y al movimiento del agua a través del suelo hacia las aguas subterráneas. Este concepto también hace referencia a la frecuencia y duración de los periodos en los que el suelo no está saturado, ya sea total o parcialmente (**Figura 13**).

Figura 13 Representación gráfica de las evidencias de óxido - reducción en el suelo relacionado con el drenaje



Nota. Tomado del IGAC (2014a).

En la metodología para la clasificación de las tierras por su capacidad de uso, el IGAC (2014b) describe las clases de drenaje de la siguiente manera:

1. Muy pobremente drenado
 - El agua se elimina tan lentamente que permanece en la superficie o cerca de ella durante largos períodos, especialmente en sectores de relieve cóncavo.
 - Presenta rasgos redoxi-mórficos (colores grises en la matriz del suelo y/o moteados) desde la superficie.
 - Puede presentar vegetación hidrófita en algunos sectores.
 - La humedad excesiva impide el desarrollo de cultivos mesofíticos (cultivos que requieren condiciones intermedias entre secas y acuáticas).
2. Pobremente drenado

- El suelo permanece húmedo desde la superficie durante gran parte del período de crecimiento de los cultivos, afectando su desarrollo normal.
- Presenta colores grises y/o moteados entre los 25 y 50 cm de profundidad.
- Esta condición se debe a un nivel freático alto, la presencia de una capa poco permeable, una conductividad hidráulica lenta o una combinación de estos factores.

3. Imperfectamente drenado

- Los suelos permanecen húmedos por períodos prolongados durante la fase de crecimiento de los cultivos.
- Los colores grises y/o moteados aparecen entre los 50 y 75 cm de profundidad.
- Generalmente tienen una capa poco permeable, un nivel freático alto o reciben agua adicional por infiltración.
- Los cultivos mesofíticos están restringidos, a menos que se implementen sistemas de drenaje.

4. Moderadamente bien drenado

- El suelo permanece húmedo por períodos cortos durante el año.
- Suele tener una capa lentamente permeable, un nivel freático moderadamente superficial y fluctuante, o recibe aguas de infiltración.

5. Bien drenado

- El agua se elimina con facilidad, pero no con rapidez.
- El nivel freático es profundo o muy profundo, aunque puede estar dentro de los 100 cm de profundidad por períodos cortos.
- Los suelos están libres de rasgos redoxi-mórficos.
- En regiones húmedas, el agua está disponible durante toda la fase de crecimiento de los cultivos.

6. Moderadamente excesivo

- El agua se elimina rápidamente del suelo.

- El nivel freático es muy raro o se encuentra muy profundo.
- Los suelos suelen tener texturas moderadamente gruesas, alta conductividad hidráulica o son muy superficiales, limitados por roca y en pendientes fuertes.

7. Excesivamente drenado

- El agua se elimina del suelo muy rápidamente.
- Generalmente son suelos de texturas gruesas o muy gruesas, con alta conductividad hidráulica, o son muy superficiales, limitados por roca y en pendientes fuertes.

Clasificación en el Mapa Geopedológico (IGAC, 2014)

El Mapa Geopedológico elaborado por el IGAC en el año 2014 clasifica las UCS según las siguientes categorías de drenaje:

- Excesivo
- Bueno
- Imperfecto
- Pobre

Además, incluye combinaciones de estas categorías debido a la existencia de más de un tipo de suelo con características particulares dentro de cada UCS. Al igual que en la variable anterior, para la clasificación del drenaje natural, se establece un valor relacionado con la probabilidad de infiltración para la recarga de acuíferos, como se observa en la **Tabla 9**.

Tabla 9 Clasificación de drenaje natural

Drenaje	Probabilidad de infiltración	Calificación	Descripción
Excesivo	Muy alta	5	El agua se elimina del suelo muy rápidamente, no presenta limitantes para el movimiento del agua, lo que promueve la recarga de acuíferos.
Bueno	Alta	4	Los suelos bien drenados permiten que el agua se infiltre fácilmente, lo que facilita la recarga de acuíferos.
Imperfecto	Moderada	3	Los suelos imperfectamente drenados pueden retener agua por períodos prolongados, lo que podría conducir a la recarga de acuíferos. Sin embargo, también pueden presentar una capa poco permeable que impide la infiltración, lo que disminuiría la probabilidad de recarga.
Pobre	Baja	2	Debido a que el agua se elimina lentamente del suelo y permanece en la superficie o cerca de ella por períodos prolongados, lo que podría permitir la recarga de acuíferos. Sin embargo, la presencia de una capa poco permeable puede limitar la infiltración.
No suelo*: zonas urbanas, aeropuerto, base militar, basurero, cantera, edificación, fosa mina carbón, tierra relave carbón, saladares, no aplica	Muy baja	1	Estas coberturas de No suelos tienen una menor probabilidad de recarga de acuíferos debido a que están compuestas por superficies impermeables o con baja permeabilidad, lo que dificulta o impide la infiltración de agua en el suelo.
No suelo*: cuerpos de agua, represa, nieve perpetua, misceláneo erosionado, misceláneo rocoso	Muy alta	5	Estas coberturas de no suelos tienen una mayor probabilidad de recarga de acuíferos debido a que la nieve perpetua puede derretirse y filtrarse en el suelo, mientras que las coberturas misceláneo erosionado y misceláneo rocoso pueden permitir cierta infiltración de agua en función de las características específicas del relieve.

Nota. Las características de “No suelos” no corresponden a drenajes naturales, no obstante, son atributos que se pueden encontrar en las UCS y deben ser calificados para aplicar la ecuación.

Teniendo en cuenta que la variable delimitadora es la UCS y que, dentro de esta, puede existir más de un tipo de suelo, así como varios grupos texturales asociados, se recomienda considerar otro atributo del Mapa Geopedológico denominado “Porcentaje”. Este atributo proporciona información sobre la probabilidad de encontrar un tipo de suelo modal con características específicas asociadas.

- Si el valor del atributo “Porcentaje” es mayor o igual a 60, se selecciona el primer grupo textural y se asigna directamente el valor propuesto en la Tabla 9.
- Si el valor es menor a 60, se toma la información de los dos primeros grupos texturales, se asignan los valores correspondientes según la tabla mencionada y se promedian.

Por ejemplo, si se presenta la información que se observa en la **Tabla 10**, el cálculo se realizaría de la siguiente manera:

Tabla 10 Ejemplo de tabla de atributos del mapa de Geopedología

Mapa_Geopedologia_11092014—Objetos Totales: 72903, Filtrados: 72903, Seleccionados: 0							
TERIAL_P	SUBGRUPO	PERFILES	PORCENTAJE	TEXTURA	DRENAJE	HUMEDAD	
32364	Aluviales finos	Typic Haplustepts, Fluvent...	MG31, MG29, MG33	50, 40, 10	Media	Bueno y pobre	Ústico y ácuico
32365	Aluviales finos	Typic Haplustepts, Fluvent...	MG31, MG29, MG33	50, 40, 10	Media	Bueno y pobre	Ústico y ácuico
32366	Aluviales finos	Typic Haplustepts, Fluvent...	MG31, MG29, MG33	50, 40, 10	Media	Bueno y pobre	Ústico y ácuico
32367	Aluviales finos	Typic Haplustepts, Fluvent...	MG31, MG29, MG33	50, 40, 10	Media	Bueno y pobre	Ústico y ácuico
32368	Aluviales finos	Typic Haplustepts, Fluvent...	MG31, MG29, MG33	50, 40, 10	Media	Bueno y pobre	Ústico y ácuico
32369	Aluviales finos	Typic Haplustepts, Fluvent...	MG31, MG29, MG33	50, 40, 10	Media	Bueno y pobre	Ústico y ácuico

Nota. Tomado de IGAC (2014).

Para la UCS que se encuentra en la primera fila, se tiene un porcentaje menor a 60. Por lo tanto, el valor de drenaje natural (o drenaje) se calcula como el promedio entre los valores correspondientes a bueno (4) y pobre (2), según la Tabla 9. El resultado de este cálculo es 3.

7.1.3.3 Verificación en campo de la variable suelos

La metodología utilizada para verificación de la información relacionada con la cartografía de unidades de suelos se basa en la exploración realizada en el terreno. A partir de esta exploración, se determinan las propiedades físicas vinculadas al proceso de recarga de acuíferos. La definición de las UCS está directamente relacionada con la densidad de análisis llevados a cabo en un área específica.

Por lo tanto, la verificación en campo depende de la cantidad y calidad de los datos que respalden los cambios o ajustes realizados en la información contenida en el Mapa Geopedológico elaborado por el IGAC.

7.1.3.4 Consideraciones de la implementación de la variable suelos a escala 1:25.000

Para la elaboración de la cartografía correspondiente a las UCS, se recomienda consultar las “especificaciones técnicas para determinar puntos de identificación de suelos en la conformación de unidades cartográficas para levantamientos agrológicos a diferentes escalas”, definidas por el IGAC.

Estas especificaciones tienen como objetivo describir las actividades necesarias para establecer los criterios técnicos en la identificación de suelos, los cuales sirven como base para la conformación de unidades cartográficas en las etapas de pre-campo, campo y post-campo.

Estas etapas se aplican en levantamientos de suelos a escalas general, semidetallada, detallada y ultra detallada, realizados por el IGAC ².

² El último documento publicado por el IGAC “Especificaciones Técnicas para Determinar Puntos de Identificación de Suelos en la Conformación de Unidades Cartográficas para Levantamientos Agrológicos a Diferentes Escalas | Instituto Geográfico Agustín Codazzi” está disponible en el siguiente enlace: <https://www.igac.gov.co/transparencia-y-acceso-a-la-informacion-publica/informacion-de-la-entidad/listado->

7.2 Componente geología

7.2.1 Subcomponente litología

Cuando el agua llega a la superficie, ya sea a través de la precipitación o por irrigación, una parte de ella se desplaza o escurre a través de un proceso llamado escorrentía, otra parte se evapora y otra se infiltra a través del suelo. La infiltración está gobernada por dos fuerzas principales: la gravedad y la acción capilar del medio que atraviesa; en suelos con poros muy pequeños se genera una fuerza contraria a la gravedad llamada capilaridad, lo que dificulta el paso de agua a través de ellos (Úbeda & Delgado, 2018).

Una vez que el agua fluye a través del suelo, llega al suelo residual, a la roca meteorizada o directamente a la roca fresca. En estas unidades litológicas, el potencial de recarga está directamente relacionado con:

- La porosidad total.
- La porosidad primaria.
- La generación de espacios físicos posteriores a la génesis de la roca, como los procesos de disolución o fracturamiento.

Sin embargo, en el subsuelo se encuentran rocas y suelos de distinto origen, composición, textura y disposición estructural. Estas características determinan las condiciones para el flujo de agua subterránea, así como su capacidad para almacenarla y transmitirla (Ingeominas, 2010).

El conocimiento geológico de un área es fundamental para evaluar la recarga de los acuíferos, ya que aspectos como las características texturales de las rocas las hacen más o menos aptas para permitir el flujo del agua.

A continuación, se describen los parámetros a evaluar y el procedimiento para la variable litología.

7.2.1.1 Características texturales

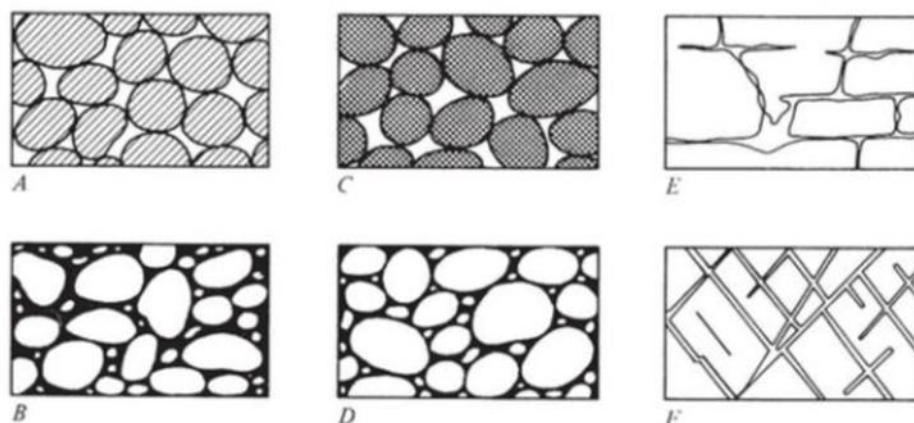
La parte de una formación rocosa que no está ocupada por materia sólida se conoce como espacio poroso (el término "poros vacíos" no se recomienda, ya que estos espacios suelen contener líquidos, aire o gases). Para los fines de este documento, se asumirá que el líquido contenido en estos espacios es agua y la parte gaseosa es aire. Si estos espacios porosos están interconectados, pueden actuar como conductos para el flujo de fluidos.

Los intersticios de una formación rocosa se clasifican en dos tipos:

- Intersticios primarios (porosidad primaria): formados durante el proceso de generación de la roca.
- Intersticios secundarios: desarrollados después de la formación de la roca, como fracturas, planos de estratificación, foliación o estructuras de disolución.

Los intersticios pueden variar en tamaño, desde enormes cavernas hasta diminutas aberturas donde el agua se retiene principalmente mediante fuerzas adhesivas (Bear, 2007).

Figura 14 Distintos tipos de intersticios



Nota. En la figura, se aprecia, A y C: depósitos sedimentarios bien seleccionados con alta porosidad; B y D: Granos mal seleccionados con baja porosidad; E: Espacios en rocas por efecto de procesos de disolución; F: Espacios en rocas por la presencia de fracturas. Tomado y modificado de Bear (2007).

Cuando el agua llega a los depósitos y a la roca, fluye a través de los poros o fracturas interconectadas hasta alcanzar mayores profundidades. Los poros que están conectados entre sí se conocen como espacio poroso efectivo. Sin embargo, el flujo de agua puede verse dificultado cuando estos poros o fracturas no están interconectados o cuando están ocupados por matriz, cemento, minerales o fluidos que llenan los espacios.

Factores que influyen en el flujo de agua

Tamaño de grano

Los granos gruesos y de tamaños similares (bien seleccionados) tienden a crear espacios amplios entre ellos, lo que aumenta la permeabilidad y facilita el flujo del agua. Por el contrario, cuando la granulometría es fina o los granos tienen tamaños dispares (mal seleccionados), los espacios resultantes son más reducidos, lo que puede restringir el movimiento del agua.

Matriz

La matriz consiste en el material más fino que se ubica entre los granos o clastos más grandes. Cuando la matriz es abundante, disminuye tanto la porosidad como la permeabilidad, limitando la infiltración de agua.

Compactación y cementación

La compactación, que acerca los granos entre sí durante la formación de la roca, y la cementación, que deposita material alrededor de los granos, reducen tanto la porosidad como la permeabilidad en las rocas sedimentarias.

Disolución de minerales

La disolución de ciertos minerales puede aumentar la porosidad al crear nuevos espacios en la estructura de la roca. Esto facilita el flujo de agua, especialmente cuando estos espacios interconectados forman conductos o incluso cavernas, aumentando así la permeabilidad.

Permeabilidad

La permeabilidad es la capacidad de las rocas o sedimentos para permitir el paso de fluidos a través de los poros que contienen. Esta propiedad es de gran importancia en la formulación de esta metodología. Las implicaciones de otros tipos de espacios, como las fracturas, se abordarán en el numeral correspondiente a la incidencia geoestructural.

7.2.1.2 Método de clasificación de la variable

La propuesta para evaluar la litología consiste en identificar las características texturales de las rocas y sedimentos presentes en el área de estudio. Esto incluye aspectos como el tamaño de grano, la presencia de matriz, cemento, vesículas, entre otros.

a) Insumos

La información requerida para la elaboración de la variable litología corresponde a las planchas geológicas realizadas por el SGC a escala 1:100.000, las cuales pueden consultarse a través del Motor de Integración de Búsqueda Geocientífica (MIIG). También se pueden utilizar mapas y memorias geológicas elaborados para estudios ambientales, así como instrumentos de planificación como Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos (PMAA) y Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCAS).

Sin embargo, dado que las características texturales de las rocas y sedimentos son fundamentales para evaluar su capacidad de permitir el flujo de agua, si se plantea utilizar la metodología a una escala de mayor detalle, es imprescindible realizar un levantamiento cartográfico en campo. Este proceso debe incluir la definición de conjuntos litológicos y cambios de facies de las unidades en superficie.

Durante el levantamiento, es esencial definir detalladamente aspectos como:

- Tipo de roca.
- Tamaño de grano.
- Presencia y tipo de matriz.
- Presencia y tipo de cemento (especialmente si la roca está altamente cementada).
- Evidencia de procesos de karstificación.
- Existencia de vesículas.
- Características de la unidad (friable o maciza).

Esto permitirá obtener información más precisa para la clasificación de las unidades, ajustando el enfoque según el área y el nivel de detalle deseado en la zona de interés.

b) Identificación de Características Texturales

Una vez identificadas las características texturales, se debe completar la tabla 11 y tabla 12, correspondientes a depósitos o rocas, según sea el caso. Finalmente, se procede a seguir el diagrama de clasificación, siguiendo la ruta correspondiente al tipo de roca o depósito (Figuras 16, 17 y 18)

Tabla 11 Características texturales para identificar para material no litificado

Nombre	Nomenclatura	Plancha	Litología predominante	Tamaño de grano	Matriz o clasto soportado	Presencia de matriz	Tipo de matriz

Tabla 12 Características texturales para identificar para las rocas

Nombre	Nomenclatura	Plancha	Tipo de roca	Litología predominante	Tamaño de Grano	Matriz o clasto soportado	¿Presencia de matriz?	¿Altamente cementada?	Tipo de Matriz	Tipo de cemento	¿Piroclástica?	¿Presencia de vesículas?

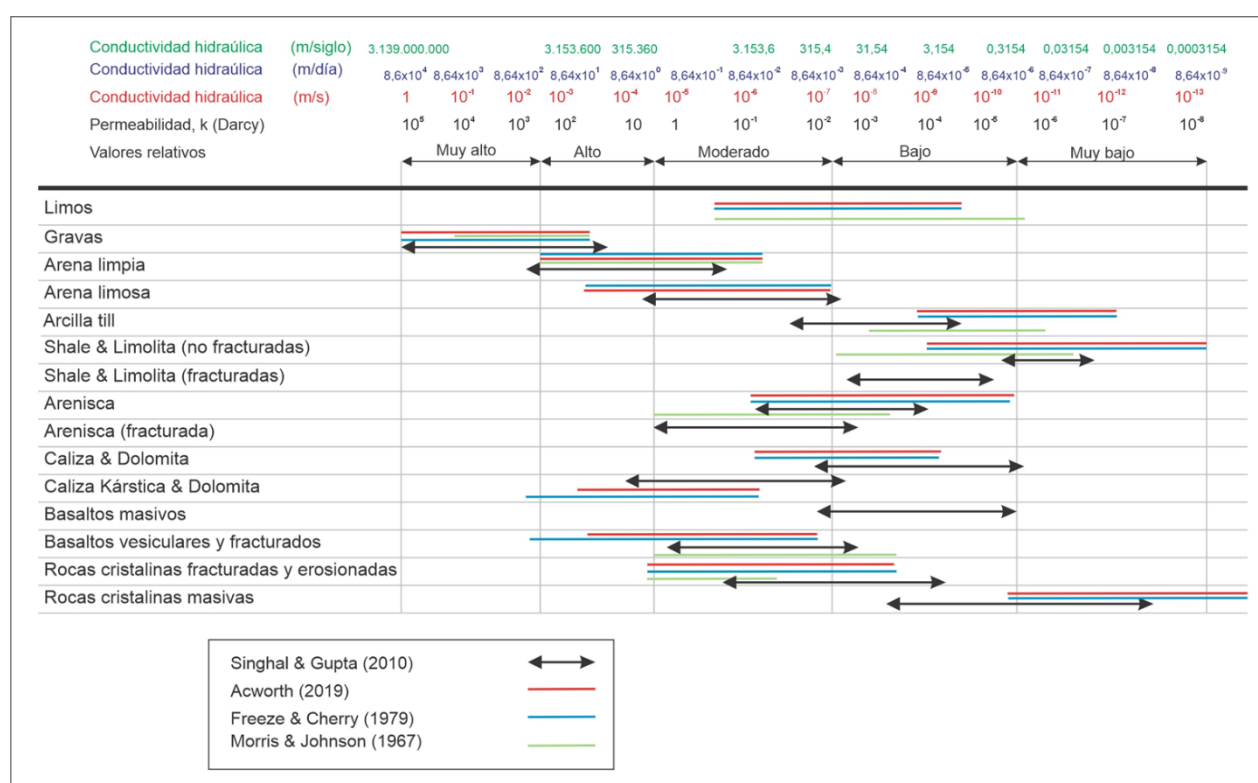
c) Calificación de la variable textura

Se elaboró un flujograma que, mediante preguntas específicas, permite asignar un valor entre 1 y 5 a cada litología. Este proceso se basó en un análisis de valores de conductividad

hidráulica en rocas y depósitos, propuestos por distintos autores como Singhal y Gupta (2010), Freeze & Cherry (1979), Acworth (2019) y Morris & Johnson (1967) (ver Figura 3).

La comparación de estos valores consideró la probabilidad de recarga, lo que permitió categorizar cada litología en función de su capacidad para permitir el flujo de agua. Como resultado, se asignaron categorías que van desde muy baja (1) hasta muy alta (5), tal como se detalla en la **Tabla 13**.

Figura 15 Conductividad hidráulica (metros/día) para distintas litologías



Nota. Rangos de conductividad hidráulica por litología de acuerdo con los criterios de autores como Singhal & Gupta (2010), Acworth (2019), Freeze & Cherry (1979) y Morris & Johnson (1967). Tomado y modificado de (Singhal & Gupta, 2010).




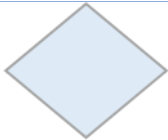
Tabla 13 Valoración de la probabilidad de recarga

Probabilidad de recarga	Calificación
Muy alta	5
Alta	4
Moderada	3
Baja	2
Muy baja	1

d) Flujograma

Una vez identificadas las características texturales de las rocas y depósitos, se seguirá la ruta establecida en el flujograma. Para aplicar correctamente este proceso, es fundamental considerar las convenciones presentadas en la **Tabla 14**.

Tabla 14 Convenciones flujograma

Símbolo	Nombre	Función
	Inicio/final	Representa el inicio y el final de un proceso
	Línea de flujo	Indica el orden de la ejecución del proceso o las operaciones. Hay que seguir el flujo en la dirección de la flecha hacia la siguiente instrucción
	Proceso	Representa cualquier tipo de operación
	Decisión	

		Permite analizar una situación, con base en valores de falso/verdadero o sí/no
--	--	--

El flujograma comienza con una pregunta inicial: ¿La unidad a evaluar está litificada? Según la respuesta (afirmativa o negativa), se deberá seguir la ruta correspondiente, ya sea para rocas o depósitos. A través de preguntas adicionales, se llegará a la calificación de la variable.

Para facilitar su visualización, el flujograma se presentará en secciones dentro de este capítulo. No obstante, estará disponible en su totalidad y con mayor detalle en el anexo 3.

Figura 16 Sección del flujograma para la calificación del material no litificado o depósitos

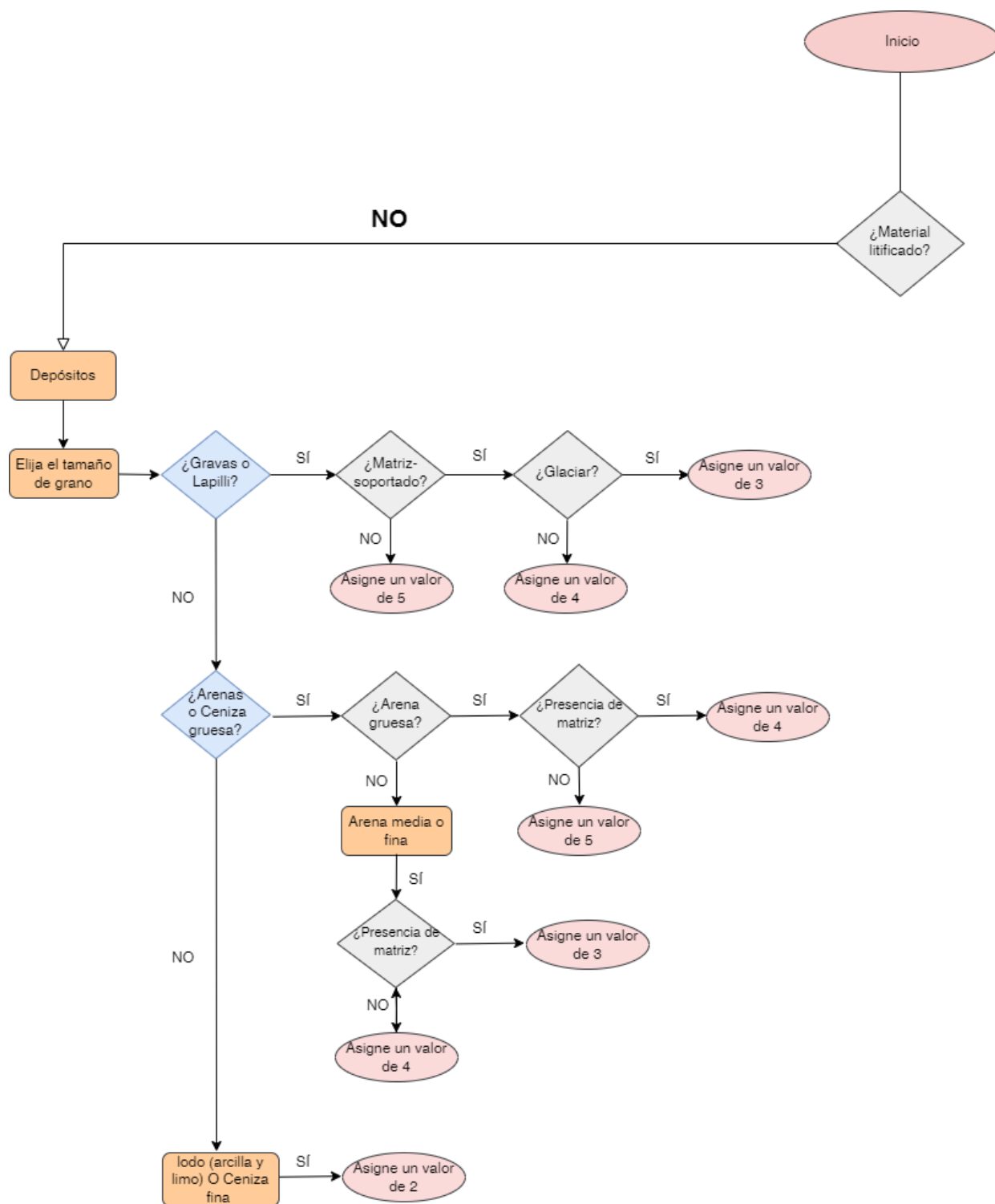


Figura 17 Sección del flujograma para la calificación textural de las rocas sedimentarias

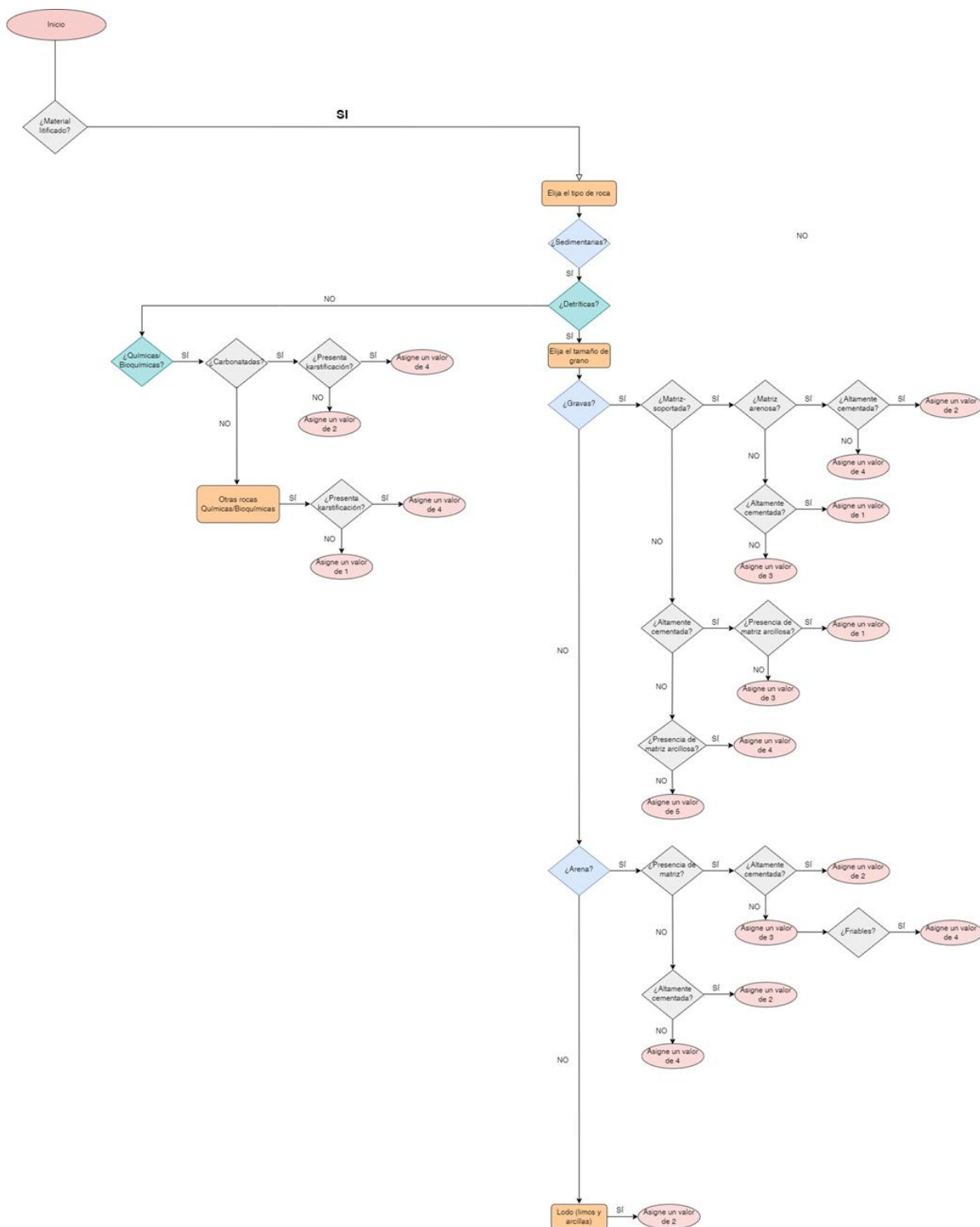
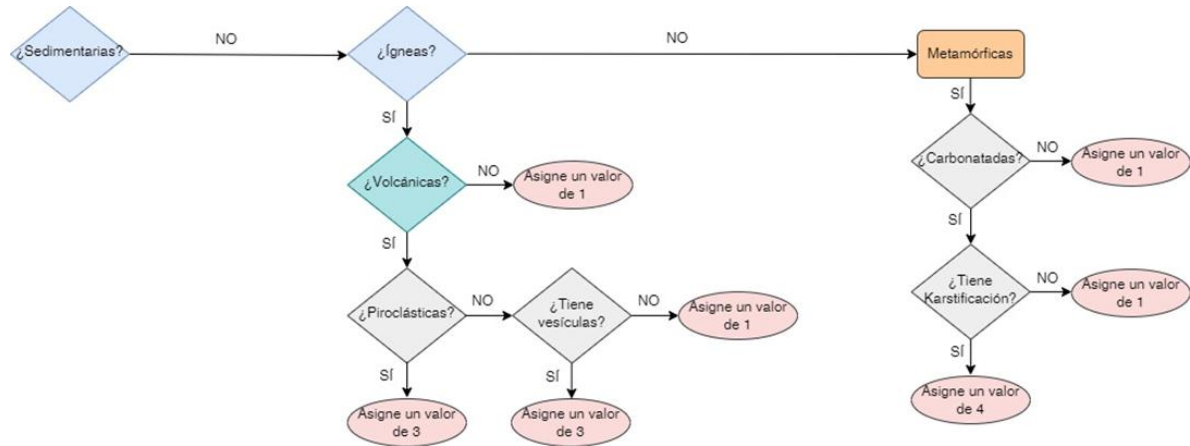
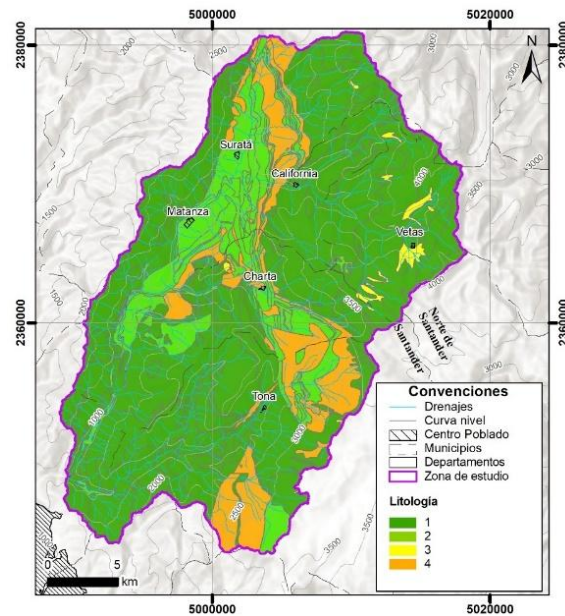


Figura 18 Sección del flujograma para asignar la calificación textural a las rocas ígneas y metamórficas



Finalmente, luego de seguir las rutas correspondientes para depósitos (o suelos transportados) y rocas, se obtendrá como resultado de la clasificación de la litología un mapa con categorías que reflejan el potencial de recarga de las unidades (ver figura 19).

Figura 19 Resultado final de la evaluación de la variable litología en las cuencas de los ríos Suratá y Tona



7.2.1.3 Verificación en campo de la variable litología

Dado que la metodología presentada en esta guía es aplicable a diversas escalas, resulta fundamental el levantamiento de información en campo para diferenciar conjuntos litológicos dentro de las unidades geológicas e identificar sus características texturales. Para ello, se recomienda evaluar los siguientes aspectos en rocas y depósitos:

- **Tipo de unidad litológica:** determinar si se trata de una unidad litificada (roca) o no litificada, correspondiente a depósitos o suelos residuales.
- **Tipo de roca:** clasificar la unidad geológica según corresponda a rocas sedimentarias (detríticas, químicas o bioquímicas), ígneas o metamórficas, y continuar con la ruta del diagrama correspondiente.
- **Tamaño y disposición de los granos:** identificar el tamaño de los granos que componen la roca o los sedimentos. Para su determinación en campo, se recomienda utilizar la escala de clasificación granulométrica de Wentworth (1992).
- **Soporte de la fábrica:** establecer si la roca o los sedimentos están soportados por los granos (grano soportado) o por la matriz (matriz soportada).
- **Tipo de matriz:** caracterizar el tamaño y la composición de las partículas más finas presentes entre los granos más grandes.
- **Cementación:** identificar el tipo de cemento y evaluar el grado de cementación de la roca.
- **Tipo de roca ígnea:** según su origen, determinar si se trata de rocas ígneas plutónicas o volcánicas. En el caso de las volcánicas, verificar la presencia de vesículas.
- **Tipo de roca metamórfica:** diferenciar entre rocas metamórficas carbonatadas y no carbonatadas.
- **Karstificación:** analizar la posible disolución del material que compone la roca, así como la remoción mecánica de granos sueltos. Estos procesos pueden generar la formación de conductos e incluso cavernas, favoreciendo la infiltración del agua.

La identificación de estos aspectos permitirá caracterizar texturalmente las unidades litológicas del área y determinar aquellas más favorables para la infiltración del agua.

7.2.1.4 Consideraciones de la implementación de la variable litología a escala 1:25.000 o más detalladas

Para la elaboración de la cartografía geológica se recomienda seguir las siguientes fases:

Fase 1: Pre-campo

Esta fase comprende las siguientes actividades:

- Definición del área de interés: determinar el área donde se realizará la cartografía.
- Recolección y análisis de información geológica: buscar, analizar e integrar datos geológicos provenientes de diversas fuentes y escalas, dando prioridad a aquellas con mayor nivel de detalle. Se recomienda consultar planchas geológicas elaboradas por el SGC junto con sus memorias explicativas, así como mapas y estudios ambientales. También se deben considerar instrumentos de planificación, tales como los PMAA y los POMCAS, entre otros.
- Obtención de fotografías aéreas: recopilar imágenes de distintas líneas de vuelo que garanticen un adecuado cubrimiento del área a cartografiar.
- Interpretación de imágenes: analizar las fotografías aéreas para identificar patrones de drenaje, contactos entre unidades, estructuras y geoformas asociadas. Se recomienda digitalizar estas interpretaciones para facilitar su comparación con las planchas geológicas y otros estudios de la región, incluso si estos están en una escala menor. Como resultado de este proceso, se generará un mapa preliminar con polígonos de las unidades geológicas, así como los lineamientos y rasgos estructurales regionales identificados.
- Obtención de información topográfica: adquirir la cartografía topográfica a escala 1:25.000 (o más detallada) del IGAC.
- Planificación de la salida de campo: con base en la información recopilada y analizada, seleccionar los puntos de interés y planificar la salida de campo para caracterizar las unidades geológicas, definir contactos y medir elementos estructurales. Este último aspecto debe realizarse conforme a lo establecido en el capítulo de Incidencia geoestructural.

Fase 2: Control de campo

Finalizada la Fase 1, se procederá con el control de campo en el área de interés. Se recomienda establecer estaciones de reconocimiento geológico y estructural cada 500 metros, aunque este intervalo deberá ajustarse según el tamaño del área y la complejidad geológica de la zona.

Las estaciones de campo deberán registrarse en la libreta de campo siguiendo las pautas establecidas en el documento "Toma de datos en la libreta de campo" de Ingeominas (2003), numerales 2.1 al 3.4 (anexo 4). Es fundamental describir los aspectos litológicos y estructurales observados entre cada estación, ya que esta información es clave para definir los contactos geológicos y construir la cartografía final.

En las zonas donde se identifiquen contactos entre unidades, se deberá realizar una observación detallada, indicando si son discordantes, gradacionales o netos. En lo posible, se debe establecer la posición estratigráfica relativa de las unidades.

Esta fase corresponde al trabajo de campo e incluye las siguientes actividades:

- Descripción de afloramientos

Para cada afloramiento, se deberán medir sus dimensiones (largo y ancho en metros). Si se considera necesario, se podrá realizar un diagrama o dibujo en la libreta de campo. Asimismo, se deberá identificar el tipo de material litológico, el cual puede corresponder a depósitos, suelo residual o rocas.

Las fotografías tomadas en campo ya sean de afloramientos o panorámicas, deberán estar referenciadas en la libreta con su código consecutivo y su respectiva orientación.

- Toma de muestras

Se deberán recolectar muestras representativas de los afloramientos descritos, procurando tomar al menos una muestra de cada unidad para la realización de distintos análisis y

secciones delgadas. En todos los casos, se recomienda tomar las muestras orientadas, indicando la posición del tope y la base.

Para la caracterización litológica, se deben utilizar tablas y diagramas de clasificación específicos para cada tipo de roca, detallados a continuación:

Rocas sedimentarias detríticas

- Composición: definir la composición de la roca utilizando diagramas de clasificación específicos.
- Armazón: identificar la composición de los granos según la propuesta de Folk (1974).
- Matriz: definir la composición de las partículas más finas presentes entre los granos más grandes, siguiendo Pettijohn et al. (1973).
- Cemento: describir la composición del material que une los granos.
- Textura: evaluar el tamaño, forma y disposición de los granos en la roca:
 - Determinar el tamaño de los granos con la escala granulométrica de Wentworth (1922).
 - Clasificar la selección granulométrica con base en Pettijohn (1987).
 - Evaluar la angularidad y esfericidad según Powers (1953) y Krumbein & Sloss (1969).
 - Determinar el espesor de las capas con Reineck & Singh (1975) y la geometría de estratificación según Campbell (1967).
- Fábrica: describir la estructura de las rocas, definiendo:
 - Soporte (clasto-soportadas o matriz-soportadas).
 - Orden (imbricado o desordenado).
 - Tipo de laminación y gradación.

Rocas sedimentarias calcáreas

- Textura: determinar la naturaleza de los clastos y su textura según la clasificación de Dunham (1962).
- Fábrica de los bioclastos: evaluar la orientación preferencial de los bioclastos.
- Características sedimentológicas:

- Matriz: identificar si es micrita, arena o cemento.
- Volumen porcentual de bioclastos: utilizar la propuesta de Kidwell (1991) para clasificar la roca como: bioclasto-soportada (densa o altamente empaquetada) y matriz-soportada (medianamente empaquetada o dispersa).
- Estructuras sedimentarias: analizar la distribución de conchas en la unidad (tope, base, gradacional o uniforme).

Rocas ígneas

- Textura: evaluar el tamaño, forma y disposición de los minerales.
- Grado de cristalinidad:
 - Holocristalina: más del 90 % de cristales.
 - Hialocristalina: mezcla de vidrio y cristales.
 - Hialina: Compuesta principalmente por vidrio.
- Tipo de textura
 - Afanítica: cristales no visibles a simple vista.
 - Fanerítica: cristales visibles sin aumento.
- Distribución del tamaño de cristales:
 - Equigranular: tamaño similar.
 - Inequigranular: diferentes tamaños (modal, bimodal o porfídica).
- Forma de los cristales
 - Euhedrales: caras bien definidas.
 - Subhedrales: caras parcialmente definidas.
 - Anhedrales: sin caras definidas.
- Composición mineral: clasificar la roca según su contenido de minerales leucocráticos o melanocráticos.
- Estructura
 - Homogénea o masiva: sin distribución preferencial.
 - Bandeada: en bandas planares, curvas o irregulares.
 - Nodulosa: formación de agregados esféricos o elipsoidales.
 - Brechoide: fragmentación irregular o con orientación preferencial.
- Morfologías adicionales:

- Vesículas: cavidades irregulares.
- Amígdalas: cavidades rellenas con minerales.
- Inclusiones o enclaves: elementos distinguibles por mineralogía, forma o color.

Clasificación de rocas ígneas

- Rocas intrusivas: usar el diagrama Q-A-P-F de Streckeisen (1976).
- Rocas ultramáficas: clasificar con el diagrama O-PX-HB de Streckeisen (1976).
- Rocas extrusivas: usar el diagrama Q-A-P-F para rocas volcánicas de Streckeisen (1976).
- Rocas extrusivas piroclásticas:
 - Clasificar con el diagrama de Schmid (1981) para rocas volcanosedimentarias.
 - Para depósitos piroclásticos, utilizar la clasificación granulométrica de Schmid (1981).

Rocas metamórficas

- Estructura: evaluar la orientación de los minerales a diferentes escalas.
 - Minerales no orientados: estructura granofélsica.
 - Minerales orientados:
 - Foliación: disposición planar de los minerales, que puede ser pizarrosa, esquistosa o gnélsica.
 - Lineación: elongación de minerales o agregados minerales.
 - Otras estructuras: porfidoclástica, porfidoblástica, augen, bandeamiento, plegamiento.
- Facies metamórficas: Utilizar el diagrama de facies de Hamblin (1992) para evaluar presión y temperatura.
- Composición mineral: Identificar los minerales presentes en los porfidoblastos y en la matriz de la roca.

Fase 3: Actividades a realizar después del levantamiento de campo

Esta fase corresponde al análisis integral de los datos obtenidos durante el levantamiento de campo, así como a la interpretación de los resultados de los análisis realizados sobre las muestras recolectadas. Las actividades para desarrollar incluyen:

- Revisar y analizar la información registrada en las libretas de campo, asegurando la coherencia y calidad de los datos recopilados.
- Refinar el mapa preliminar elaborado en la Fase 1, incorporando mayor precisión en la identificación de los polígonos y conjuntos litológicos, así como en la identificación de contactos entre unidades y estructuras geológicas regionales.
- Elaborar una memoria técnica detallada que documente las características de las unidades cartografiadas, resaltando sus aspectos más relevantes con base en las observaciones de campo y los resultados de los análisis de laboratorio

7.2.2 Subcomponente incidencia geoestructural

Aproximadamente el 50 % de la superficie terrestre está cubierta por rocas duras, incluyendo rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias fuertemente cementadas. Estas pueden desarrollar una permeabilidad moderada a buena a través del fracturamiento (Singhal y Gupta, 2010), formando medios donde la ocurrencia del agua subterránea está controlada por conductos definidos por discontinuidades, como superficies de fractura, foliación y estratificación. Además, los eventos tectónicos juegan un papel determinante en el desarrollo de sistemas kársticos en rocas calcáreas, generando grandes cavidades que pueden corresponder a sistemas hidrogeológicos de gran importancia. Por ello, resulta fundamental caracterizar en detalle la influencia de las estructuras deformativas, particularmente las frágiles (fracturas), en la recarga, tránsito, almacenamiento y descarga de las aguas subterráneas.

Según Singhal y Gupta (2010), las características hidrogeológicas de los sistemas fracturados difieren de las de los acuíferos en rocas granulares, ya que el espacio físico efectivo está controlado por estructuras como diaclasas y fallas. Estos espacios para el movimiento del agua son menos homogéneos, presentan una mayor anisotropía y tienden a generar flujos

más rápidos y turbulentos. Dicho comportamiento está determinado por las características físicas de la red de fracturas (longitud, ancho, inclinación, dirección, sinuosidad y entrecruzamiento, entre otras), las cuales dependen del ambiente tectónico y del campo de esfuerzos al que está sometida la deformación de las rocas.

El flujo de fluidos en la corteza terrestre está fuertemente influenciado por la deformación frágil, y el ambiente tectónico que la controla determina tanto la orientación como la magnitud del tensor de permeabilidad resultante (Faulkner y Armitage, 2013). Este tensor representa matemáticamente el patrón de circulación del agua en medios fracturados, considerando que la permeabilidad no es isotrópica y varía en función de la dirección.

Asimismo, la arquitectura interna de las zonas de falla, determinada por la relación entre sus núcleos y zonas de daño, influye en la acumulación de agua subterránea y ejerce un control fundamental sobre su tránsito en la parte superior de la corteza terrestre. Estas estructuras pueden actuar como conductos o barreras hidráulicas: el núcleo de la falla, caracterizado por la molienda de rocas, suele constituir una barrera al flujo, mientras que las zonas de daño, altamente fracturadas, pueden facilitar el tránsito del agua (Caine et al., 1996; Curzi et al., 2023).

Dado lo anterior, es imprescindible definir con precisión las propiedades y la distribución espacial de las zonas de daño asociadas a las principales estructuras que afectan las rocas del territorio colombiano. Esta información es clave para evaluar la recarga de acuíferos cuya porosidad secundaria o espacio físico efectivo esté dominado por fracturas.

La presente metodología propone el uso de sensores remotos y análisis SIG para identificar áreas con mayor potencial de recarga, mediante la detección de zonas con alta deformación frágil asociada a los principales sistemas de fallas y diaclasas maestras. Para ello, se evaluarán parámetros como la densidad y conectividad de lineamientos, el espesor de las zonas de daño y la orientación de las discontinuidades con respecto a los campos de esfuerzos actuales.

Esta propuesta se fundamenta en metodologías y criterios aplicados en diversas regiones del mundo para la identificación de zonas potenciales de recarga mediante sensores remotos (Arulbalaji et al., 2019; Aslan y Çelik, 2021), así como en la adaptación de enfoques

desarrollados por Meijerink (2007), Singhal y Gupta (2010) y Fernandes et al. (2023) para la evaluación del control estructural sobre la disponibilidad de agua subterránea.

En el siguiente apartado, se describen los parámetros a evaluar y su incidencia en el control de la ocurrencia del agua subterránea.

7.2.2.1 Densidad de lineamientos

La interpretación y el análisis estadístico de lineamientos han sido herramientas ampliamente utilizadas para evaluar el potencial hidrogeológico en medios fracturados. Diversos estudios han demostrado una correlación positiva entre la ubicación de pozos de agua subterránea altamente productivos y su proximidad a lineamientos que representan trazas de fracturas en el subsuelo (Waters et al., 1990).

La premisa fundamental de esta metodología radica en que la circulación de agua en rocas fracturadas está directamente relacionada con la presencia de fracturas, y los lineamientos constituyen, en la mayoría de los casos, la expresión superficial de estas zonas de fractura (Fernandes et al., 2023).

O'Leary et al. (1976, citado en Waters et al., 1990) definen un lineamiento como una característica lineal simple o compuesta observable en la superficie del terreno, cartografiable y distinguible de los patrones geomorfológicos circundantes, cuya presencia sugiere la existencia de una estructura subsuperficial subyacente.

7.2.2.2 Conectividad de los lineamientos

La abundancia y disposición de las discontinuidades dentro de una red pueden influir en propiedades físicas clave, como la rigidez, la resistencia, la porosidad y la permeabilidad (Adler y Thovert, 1999, citado en Sanderson y Nixon, 2015). Estas últimas son determinantes en la evaluación del potencial de recarga en áreas donde predominan rocas cristalinas y sedimentarias altamente cementadas.

La identificación de relaciones entre los elementos de las redes de fracturas ha sido ampliamente utilizada en diversas aplicaciones vinculadas a la evaluación del potencial de agua subterránea, incluyendo la estimación de la permeabilidad (e.g., Hestir y Long, 1990, citado en Manzocchi, 2002) y la determinación de zonas con mayor potencial hidrogeológico a partir del análisis de lineamientos y sus intersecciones (Singhal y Gupta, 2010).

En este contexto, el análisis estadístico de las intersecciones de lineamientos en un área específica resulta una herramienta útil, basada en la premisa de que la confluencia de discontinuidades con diferentes orientaciones incrementa la probabilidad de presencia de estructuras permeables.

7.2.2.3 Orientación preferencial de los lineamientos

El análisis de la orientación es a menudo el primer paso en la evaluación de una red de fracturas y discontinuidades en orden a definir las principales tendencias y así identificar conjuntos de fracturas (Fisher, 1993 en Nyberg et al., 2018). Además, la importancia relativa de las fracturas en el control de las propiedades de las rocas (ej. permeabilidad y porosidad) depende de la orientación, el espaciamiento y la conectividad de la red.

Determinar las tendencias dominantes en el área evaluada permite definir dominios hidroestructurales en los cuales el comportamiento y potencial hidrogeológico puede ser diferente debido a las características de las discontinuidades, a su vez, la capacidad de las fracturas para permitir la infiltración del agua está en gran medida controlada por su abertura, la cual es una propiedad determinada por su posición con respecto al campo de esfuerzos actuante en el presente.

Dado lo anterior, se sugiere construir diagramas estereográficos que muestren las orientaciones preferenciales de los lineamientos en el área estudiada con el fin de establecer posibles cambios en el comportamiento hidrogeológico definidos por variaciones en la orientación, así como para facilitar la identificación de las discontinuidades con mayor potencial hidrogeológico según su posición con respecto al esfuerzo máximo actual.

7.2.2.4 Zonas de daño y su influencia en el desarrollo de permeabilidad secundaria en las rocas

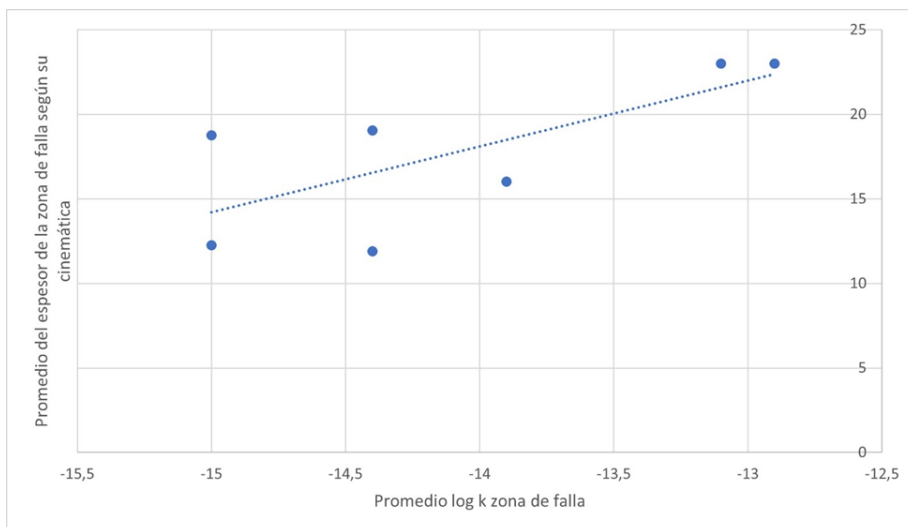
Las fallas frágiles han sido tradicionalmente consideradas como estructuras planares sencillas, sin embargo, estudios recientes las han descrito como una compleja zona volumétrica compuesta de una variedad de estructuras internas, tales como superficies de deslizamiento, asociaciones de rocas de falla y estructuras deformativas subsidiarias (Choi et al., 2016).

En la presente guía se adopta la definición de zona de daño dada por Kim et al. (2004), en donde se establece que corresponde al volumen de roca deformada alrededor de una superficie de falla producto de la iniciación, propagación, interacción y acumulación del desplazamiento a lo largo de las fallas.

La arquitectura de las zonas de falla tiene impacto sobre la recarga de acuíferos por porosidad secundaria y mixta, debido a que las zonas de falla y las estructuras permeables relacionadas conforman un control de primer orden sobre el flujo de fluidos en la parte superior de la corteza (Caine et al., 1996); de esta manera, la identificación de las zonas de daño asociadas a las principales estructuras presentes en el área a evaluar es un parámetro fundamental para la caracterización del potencial hidrogeológico de la misma, ya que, como es evidenciado por Curzi et al. (2023) la distribución de la permeabilidad en una zona de falla muestra valores máximos en la zona de daño y valores mínimos en el núcleo adyacente, y en ambos es mayor que la permeabilidad asociada al protolito.

La **figura 20** muestra la correlación positiva que presenta el espesor de la zona de falla con la permeabilidad generada asociada al desarrollo de discontinuidades transmisivas. Para la construcción del gráfico, se usó la base datos global de permeabilidad de zonas de falla presentada por Scibek (2020), quien compila datos de permeabilidad total del volumen de roca y de la matriz en 410 zonas de falla a nivel global. Se sugiere consultar esta base de datos de acceso libre para conocer más detalles sobre la relación de ciertas características de las fallas con la permeabilidad desarrollada, como la naturaleza del protolito, la longitud de las estructuras, el espesor de la zona de daño y el núcleo de falla.

Figura 20 Correlación positiva entre el espesor de la zona de daño y la permeabilidad desarrollada



Fuente: Datos tomados de Scibek (2020).

Lo anteriormente descrito, refleja la importancia de las fallas frágiles y su arquitectura en la modificación de la distribución de la permeabilidad en la porción superior de la corteza afectada por deformación frágil, aumentado así el potencial de las rocas para permitir la infiltración, tránsito y acumulación de agua subterránea.

7.2.2.5 Análisis de la posición de las discontinuidades con respecto al campo de esfuerzos.

Desde un punto de vista hidrogeológico, es importante distinguir entre fracturas de cizalla y fracturas extensionales ya que las diaclasas dilatacionales son más abiertas y poseen una mayor conductividad hidráulica que las fracturas de cizalla (Singhal y Gupta, 2010). Fossen (2016) menciona que las fracturas extensionales generalmente se encuentran rellenas con fluidos, entre los cuales se cuenta el agua subterránea; dado lo anterior, la identificación de las discontinuidades con mayores aberturas es un paso fundamental para la valoración del potencial de una red de fracturas para transportar el agua en el subsuelo.

7.2.2.6 Insumos para la valoración de la incidencia geoestructural en el proceso de recarga.

La información requerida para la construcción de la variable incidencia geoestructural corresponde a información cartográfica geológica a diferentes escalas e información de sensores remotos.

Se deben compilar los mapas geológicos a escala 1:100.000 con los que cuenta el Servicio Geológico Colombiano (SGC) que cubran el área a evaluar, de igual forma, se debe recopilar la información a escala más detalladas disponible, tanto si es construida por el usuario de la guía como si es de fuentes secundarias de acceso libre. Es de resaltar que en ocasiones los mapas geológicos carecen de información estructural precisa y tampoco son comunes las coincidencias en los empalmes, ya que el proceso de construcción de las planchas geológicas ha trascendido en el transcurso de los más de 100 años de la entidad y que éstos deben ser permanentemente actualizados usando tanto las técnicas modernas como los criterios actuales.

Debe tenerse en cuenta que, dada la carencia de información detallada sobre deformación tectónica en la mayor parte del territorio nacional, incluso la aplicación de la guía metodológica a escalas regionales (1:100.000) debe contar con información estructural colectada en campo por parte del usuario que permita la calibración de la interpretación morfotectónica realizada, así como un mejor entendimiento de las características geométricas de las redes de fractura que controlan el tránsito del agua en el subsuelo.

El acceso de manera expedita a los insumos cartográficos a diversas escalas con los que cuenta el SGC se hace a través del Motor Integrado de Información Geocientífica (MIIG), en el siguiente portal <https://miig.sgc.gov.co/Paginas/advanced.aspx>; a su vez, el SGC cuenta con un geovisor en el que se disponen los archivos nativos y en formato pdf de la cartografía oficial, al cual se accede a través del enlace https://srvags.sgc.gov.co/Flexviewer/Estado_Cartografia_Geologica/.

Como guía para la armonización y empalme de las estructuras geológicas en áreas cubiertas por más de una plancha a escala 1:100.000, se sugiere consultar la base estructural del Atlas

geológico de Colombia a escala 1: 500K, el cual se encuentra disponible en la página web del Servicio Geológico Colombiano (SGC), a través del siguiente enlace https://www2.sgc.gov.co/MGC/Paginas/agc_500K2023.aspx.

Para la interpretación morfotectónica de rasgos lineales que presumiblemente representan discontinuidades en la corteza terrestre, se deben compilar imágenes satelitales tanto ópticas como de radar, a su vez, se hace necesaria la obtención de modelos digitales de elevación del terreno (MDE) de diferentes resoluciones espaciales y fotografías aéreas de diferentes escalas y momentos, según las necesidades del usuario y la escala de los insumos con los que se cuenta.

De igual forma, la obtención e interpretación de fotografías aéreas a diferentes escalas es de gran utilidad para la definición de zonas en donde el fracturamiento ejerza un control de primer orden en la infiltración del agua. Por otra parte, si se cuenta con insumos a escala detallada como levantamientos topográficos con tecnología LIDAR (Light Detection and Ranging) se sugiere su uso, evitando la mezcla de escalas para las diversas variables que conforman la guía metodológica.

7.2.2.7 Método para la calificación de la variable

A continuación, se describe de manera general la metodología a seguir para la calificación de la variable incidencia geoestructural. Los detalles de las herramientas SIG utilizadas se presentan en el Manual SIG anexo a la Guía metodológica.

Mapa de densidad de lineamientos ponderado

Para evaluar el efecto y control que la deformación frágil ejerce sobre la infiltración del agua en las áreas donde se aplique la guía metodológica, se debe partir de la interpretación de rasgos lineales a partir de los insumos anteriormente mencionados. Cualquier estrategia que facilite la interpretación objetiva de los rasgos morfotectónicos debe ser aplicada, por ejemplo, mapas de relieve en rojo (RRIM por sus siglas en inglés) y modelos de sombras multidireccionales; a su vez, la información estructural recolectada en campo con la que se cuenta debe ser involucrada en la interpretación.

En el caso de las cartografías geológicas a escala 1:100.000, algunos mapas geológicos del Servicio Geológico Colombiano (SGC) cuentan con rasgos lineales cartografiados, tales elementos deben ser tenidos en cuenta en el análisis evitando la redundancia con los rasgos interpretados por el usuario de la guía. Estos rasgos se identifican en las bases de datos geográficas con el código 180.000 definidos como lineamientos fotogeológicos.

Teniendo en cuenta que una característica morfológica lineal puede representar varios tipos de estructuras planares que no necesariamente aumentan el potencial hidrogeológico de las rocas afectadas, con el fin de eliminar la subjetividad en la interpretación y tener mayor seguridad de que la traza lineal representa zonas de mayor densidad de fracturamiento en el macizo rocoso, se sugiere que el mapeo de estas características se haga basado en elementos morfotectónicos que evidencian fallamiento de la corteza tales como silletas y hombreras de falla, facetas triangulares, cauces lineales y con fondo en forma de “V”, ganchos de flexión entre otros.

En el caso de la que los insumos con los que se cuenten sean a escala 1:100.000, para garantizar la escala de trabajo los lineamientos interpretados deben tener una longitud mayor o igual a 2 km. Para escalas detalladas se pueden involucrar rasgos lineales más cortos.

De esta manera, el resultado de esta etapa será un mapa de lineamientos que presumiblemente representa la configuración de la red de fracturas que afecta los macizos rocosos aflorantes en la región evaluada, teniendo en cuenta que los patrones de fallamiento presentan un grado de autosimilitud, la cual es una característica de geometrías fractales (Walsh y Watterson, 1993), definidas como patrones que son invariantes con la escala.

Dado lo anterior, de manera general se puede asumir que la configuración a escala regional representada por los rasgos lineales, representa la configuración del patrón de fracturas a escala mesoscópica o de afloramiento; sin embargo, lo anterior debe ser corroborado mediante mediciones de datos estructurales, aberturas y análisis cuantitativos del fracturamiento en el macizo rocoso.

La propuesta para evaluar la influencia de los lineamientos sobre el potencial de recarga en un sector específico está fundamentada en la distribución estadística de los elementos por

unidad de área, de forma que, con las características interpretadas mediante el uso de sensores remotos (imágenes satelitales de radar u ópticas, fotografías aéreas, etc.), se debe generar un mapa de densidad que represente la longitud total de los lineamientos por unidad de área (km/km^2).

El mapa de densidad de lineamientos debe ser ponderado, dando mayor peso en la evaluación del potencial de recarga a las discontinuidades que se dispongan de manera paralela al esfuerzo principal máximo del campo de esfuerzos actual (o, lo que es similar, perpendicular al esfuerzo principal mínimo), partiendo de la premisa que estas tienen un mayor potencial para favorecer el tránsito del agua subterránea debido a que son de carácter tensional.

Con el propósito de identificar las discontinuidades que posiblemente sean de carácter tensional y por ende presenten mayor potencial para la infiltración del agua subterránea, se hace necesaria la identificación de la orientación del esfuerzo máximo horizontal, para tal fin, se sugiere la consulta del mapa de trayectorias de la dirección de acortamiento horizontal máximo en todo el territorio colombiano publicado por Arcila y Muñoz- Martín (2020), así como la compilación presentada por el World Stress Map, disponible en el enlace <https://www.world-stress-map.org/>.

De esta manera, los lineamientos que se dispongan subparalelos a la orientación identificada para el área evaluada, serán de carácter tensional y se les debe asignar un mayor peso en el potencial de recarga (5), de igual forma, la naturaleza de discontinuidades que se dispongan de manera perpendicular al esfuerzo máximo horizontal se presume como compresiva y debe asignarse un valor de 3, finalmente, discontinuidades en posiciones intermedias entre estos extremos, al posicionarse en el campo tensional de la elipse de deformación, se asumen que presentan una componente transtensiva, por lo cual, se debe asignar un peso de 4 con respecto al potencial de recarga, como se indica en la tabla 1. Para tal fin, se asumen como discontinuidades paralelas a la dirección del esfuerzo máximo aquellas que se dispongan con rumbo de más o menos 15° con respecto a este y perpendicular en un rango entre $90 \pm 15^\circ$, toda discontinuidad posicionada en valores intermedios entre estos dos extremos se les debe asignar un peso de 4 (**Figura 21**).

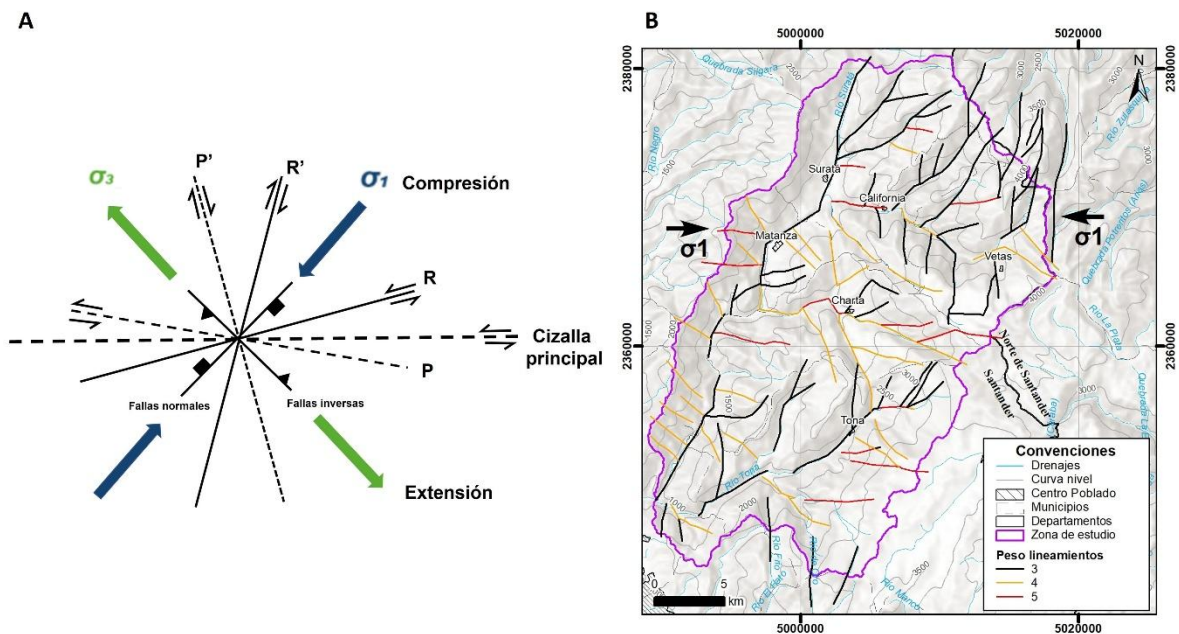


Figura 21. Calificación de los rasgos lineales según su posición con respecto al esfuerzo máximo. A) Distribución de los esfuerzos tensionales y compresivos y desarrollo de fracturas de diferente naturaleza bajo un campo de esfuerzos cuyo eje de compresión se dispone en dirección NW-SE. Tomada y modificada de Hillacre et al. (2018). B) Ejemplo de rasgos lineales calificados en las cuencas hidrográficas de los ríos Surata y Tona, departamento de Santander. Dirección del esfuerzo máximo tomada de Velandia (2017).

Lo anteriormente descrito se fundamenta en consideraciones teóricas sobre la naturaleza de las fracturas bajo una dirección específica del campo de esfuerzo y el análisis de sensores remotos, sin embargo, la información estructural colectada en campo por el usuario de la guía es relevante en este punto de la metodología.

Es necesario contar con datos de la distribución de aberturas de fracturas en el área de estudio y su disposición espacial (rumbo y buzamiento), y estos datos deben ser incorporados en la ponderación de los rasgos lineales de mayor escala; por ejemplo, si dado el levantamiento de las características de las redes de fractura presentes en el área evaluada, se identifica que las fracturas con orientación preferencial NNE-SSW evidencian las mayores aberturas, se debe asignar mayor peso a los lineamientos que tengan esta disposición siguiendo la valoración sugerida en la tabla 1, sin olvidar que los rasgos morfotectónicos paralelos a la dirección del

esfuerzo máximo también deben tener una mayor valoración si esta no coincide con las mayores aberturas definidas en el campo, esto fundamentado en que en ocasiones se presentan sesgos en las mediciones por la disponibilidad de afloramientos, la orientación de los mismos y la aleatoriedad del muestreo, entre otros.

Tabla 15. Valoración de la probabilidad de recarga de los lineamientos según su posición con respecto al esfuerzo máximo

TIPO DE LINEAMIENTO	PROBABILIDAD DE RECARGA	CALIFICACIÓN
Paralelo con respecto al esfuerzo máximo	Muy alta	5
Oblicuo con respecto al esfuerzo máximo	Alta	4
Perpendicular con respecto al esfuerzo máximo	Moderada	3

El resultado obtenido será un mapa con una distribución continua de valores, de los cuales, los valores mayores tienen un mayor potencial para la recarga, identificando zonas en donde la incidencia de la deformación frágil es mayor, a su vez, valores menores representan zonas con menor desarrollo de discontinuidades, por lo cual, su valoración para el potencial de recarga será más baja (**Figura 22**).

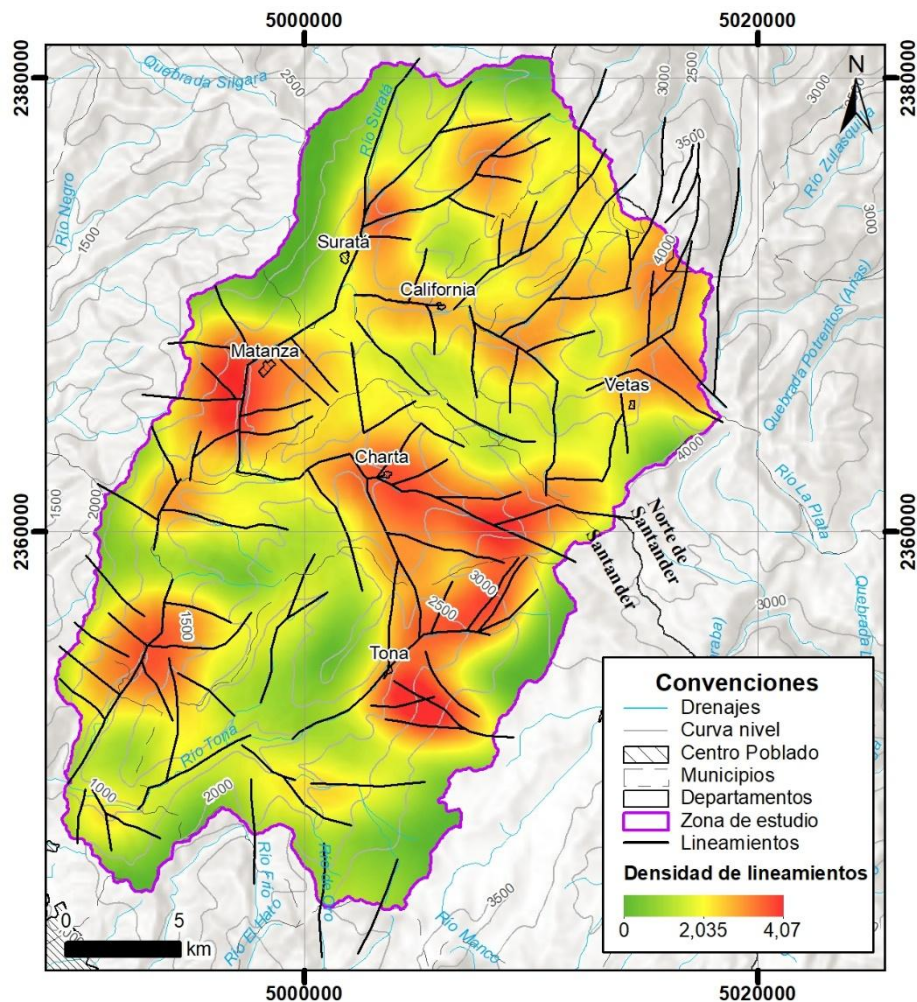


Figura 22. Mapa de densidad de lineamientos para las cuencas de los ríos Surata y Tona

7.2.2.8 Mapa de conectividad de lineamientos

El análisis propuesto parte de la categorización de los tipos de nodos existentes en la red de lineamientos interpretada, de esta manera, se pueden presentar nodos tipo I asociados a terminaciones aisladas, nodos tipo Y en terminaciones de una discontinuidad sobre otra y nodos tipo X cuando los lineamientos se entrecruzan. El principio fundamental consiste en que redes que presenten mayor frecuencia de nodos conectados (tipo Y y X) tienen un mayor potencial para permitir la infiltración del agua.

La intersección de dos o más lineamientos debe ser representada como puntos, asociándole una simbología según su categorización (Y o X) para generar un mapa que represente la

frecuencia de nodos conectados mostrando zonas de mayor intensidad de fracturamiento relativas (**Figura 23**).

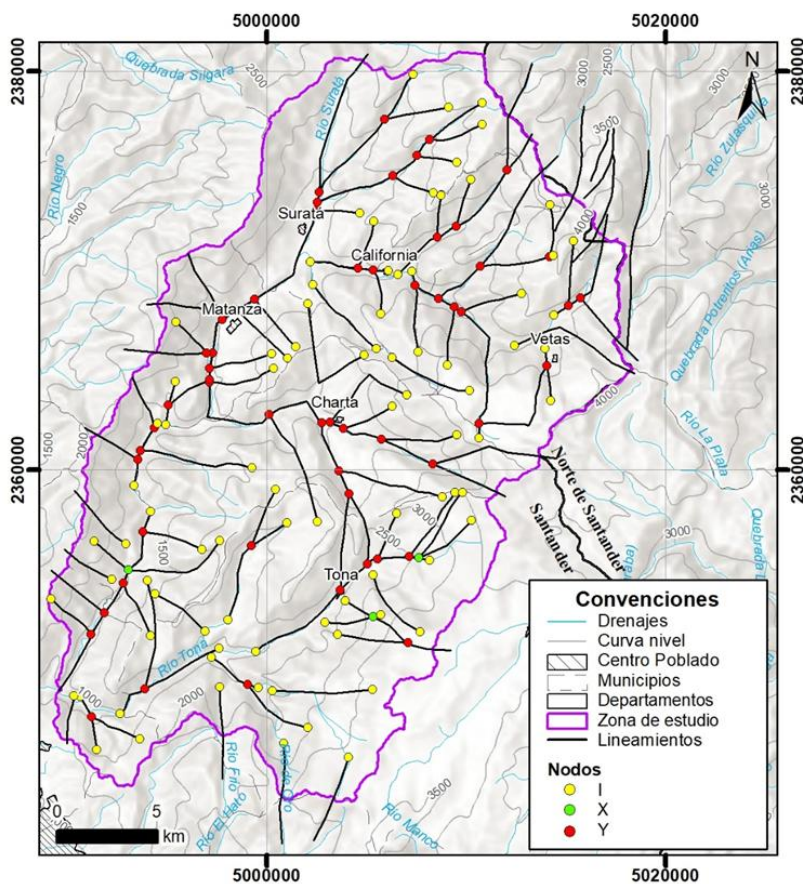


Figura 23. Ejemplo de categorización de las relaciones topológicas entre lineamientos para las cuencas de los ríos Suratá y Tona, departamento de Santander

De esta manera, el resultado final será un mapa de densidad de nodos conectados mostrando una variación continua en el área evaluada; el mayor potencial de recarga se relaciona con zonas en donde se presente mayor frecuencia de nodos tipo X e Y, a su vez, el menor potencial se asocia con sectores en donde dominen las terminaciones aisladas de lineamientos (nodos tipo I) (**Figura 24**).

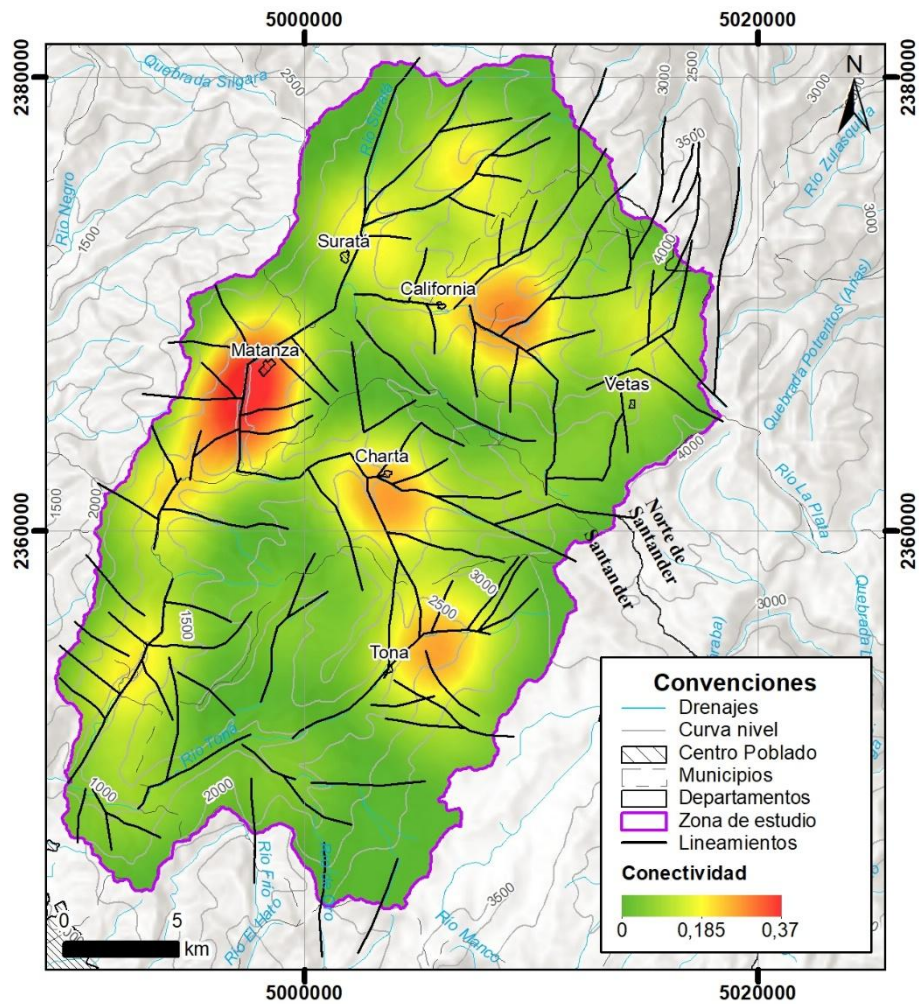


Figura 24. Mapa de conectividad de lineamientos en las cuencas de los ríos Surata y Tona. Se puede establecer una relación con la distribución de los tipos de nodos en la figura anterior

Con el fin de optimizar la categorización de los tipos de nodos de la red de lineamientos, se sugiere el uso de la herramienta de acceso libre NetworkGT (Nyberg et al., 2018) desarrollada para las plataformas ArcGIS y QGIS, la cual automatiza el proceso de definición de los nodos y la construcción de mapas de frecuencia por unidad de área.

7.2.2.9 Definición de las zonas de daño de las fallas

Para la aplicación de la propuesta se sugiere determinar y construir una zona de influencia (buffer) alrededor de las fallas presentes en la cartografía oficial a escala 1:100.000 producida por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y asignar un peso de acuerdo con la influencia de cada tipo de estructura en la probabilidad de infiltración del agua subterránea, teniendo en cuenta que en este volumen de roca aumenta la probabilidad de infiltración.

Para la determinación del espesor que debe tener la zona de daño asociada a las fallas cartografiadas, se sugiere usar las relaciones empíricas existentes entre las características y elementos de una falla (ej. Kim y Sanderson, 2005; Faulkner et al., 2011, Choi et al., 2016), las cuales establecen una relación directa entre la longitud y el desplazamiento y entre el desplazamiento y el espesor de la zona de daño aproximado.

Dado lo anterior, el desplazamiento de una falla es aproximadamente un tercio de su longitud ($D \approx 0,3L$) y la relación entre el desplazamiento y el espesor de la zona de daño es 1:100, siendo cien veces menor el espesor (Fossen, 2020); este último valor obtenido debe ser usado para definir la zona de influencia de las fallas presentes en el área evaluada. De manera que se debe medir la longitud de las fallas o segmentos de falla presentes en el área en la que se esté aplicando la guía metodológica y emplear las siguientes relaciones:

- **Ecuación 3** Desplazamiento de la falla o segmento de la falla

$$Df = 0,3 \times L \quad Ezd = \frac{Df}{100}$$

Donde: Df corresponde al desplazamiento de la falla o segmento de falla, L es la longitud y Ezd responde al espesor aproximado de la zona de daño.

Es importante anotar que lo anteriormente definido corresponde a una aproximación, ya que, el espesor de la zona de daño de una falla depende de la litología, las propiedades mecánicas de las capas, su espesor, la rotación progresiva de las fallas y su desplazamiento (Fossen, 2020); así, los espesores son variables a lo largo del rumbo de la estructura, por lo tanto, se

sugiere que en sectores en donde se cuente con la información primaria sobre el ancho de las zonas de daño, se use ese valor para la definición de la zona de influencia de las estructuras.

La calificación establecida para las estructuras se definen con base en su importancia relativa en el control de la infiltración, de esta manera, se sugiere asignar el mayor valor a las fallas transcurrentes ya que en estas estructuras la componente vertical del tensor de permeabilidad es mayor que en fallas normales o inversas (Faulkner et al., 2013), favoreciendo el flujo vertical y posiblemente la recarga de acuíferos en profundidad.

De igual forma, Fernandes et al. (2023) mencionan que las líneas de intersección entre fallas conjugadas de carácter transcurrente son verticales, favoreciendo la infiltración vertical; por el contrario, las líneas de intersección de fallas conjugadas tanto normales como inversas son líneas horizontales favoreciendo canales de flujo en esta dirección. A su vez, fracturas de bajo ángulo (régimen compresivo) son más propensas a mostrar una disminución en la conductividad hidráulica con la profundidad debido al incremento de la presión litostática, por el contrario, es probable que la conductividad hidráulica de fracturas verticales (régimen de transurrencia) esté menos afectada por la profundidad (Fernandes et al., 2023). La tabla 2 muestra la calificación y tipo de estructura sugeridos.

Tabla 16. Valoración de la probabilidad de recarga de las fallas según su cinemática.

TIPO DE FALLA	PROBABILIDAD DE RECARGA	CALIFICACIÓN
Fallas de rumbo	Muy alta	5
Fallas normales	Alta	4
Fallas inversas	Moderada	3
Fallas sin definir	Moderada	3

Cuando el movimiento de las estructuras tenga componente tanto vertical como horizontal (fallas oblicuas), se sugiere que se asigne el peso a la estructura de acuerdo con la dominancia de las componentes, por ejemplo, fallas dextrales normales tendrán una asignación de 5 y fallas normales dextrales tendrán un peso de 4.

Como el buffer se limita a las zonas de daño de las fallas, para obtener un ráster continuo en toda el área evaluada, se sugiere asignar un peso de 1 a los píxeles por fuera de los límites de las zonas de daño.

7.2.2.10 Verificación en campo de la variable incidencia estructural

7.2.2.10.1 Sugerencias para la descripción de redes de fractura en campo

Teniendo en cuenta que la metodología de sobreposición de mapas propuesta en este informe es aplicable a diferentes escalas, su empleo a escalas semidetalladas y detalladas requiere el levantamiento de información estructural detallada sobre el macizo rocoso deformado. A continuación, se listan los datos y descripciones necesarias:

- **Orientación preferencial de las discontinuidades:** se deben realizar diagramas estereográficos que permitan determinar las orientaciones dominantes en las redes de fractura, además, tales orientaciones se deben relacionar con las tendencias regionales tanto de las fallas cartografiadas como de los rasgos lineales interpretados.
- **Intensidad y densidad del fracturamiento:** la intensidad del fracturamiento se relaciona con el espaciamiento promedio entre las fracturas, a su vez, la densidad se define como el número de fracturas por unidad de área. Para su determinación, se pueden usar líneas de muestreo o ventanas circulares. Como guía se recomienda revisar el flujo de trabajo para la caracterización cuantitativa de redes de fractura propuesto por Watkins et al., (2015) o los trabajos del Servicio Geológico Colombiano (SGC).
- **Persistencia:** las fracturas con mayor longitud definen canales de flujo con mayor potencialidad para transmitir el agua subterránea, de esta manera, la cuantificación de la persistencia de las discontinuidades se configura como un parámetro esencial para determinar cuáles familias controlan los flujos subterráneos.

- **Abertura:** teniendo en cuenta que las fracturas tensionales presentan mayor conductividad hidráulicas que las fracturas de cizalla, se hace necesario identificar cuáles familias de fractura presentan mayor abertura o separación entre las paredes. Para su determinación en el campo se recomienda el uso del comparador visual presentado por Ortega (2006). Se debe analizar la distribución espacial de los datos de abertura cuantificados, así como realizar un tratamiento estadístico descriptivo de los mismos.
- **Relleno:** el porcentaje de relleno mineral de las fracturas disminuye la conductividad hidráulica de las mismas, de esta manera, los elementos más promisorios para favorecer la infiltración del agua corresponden a las fracturas con aberturas considerables y sin relleno.

Siguiendo la sugerencia realizada en el apartado de verificación de campo del subcomponente Litología, se deben realizar controles estructurales al menos cada 200 m dentro del área de estudio en los cuales se levante la información previamente descrita; cabe resaltar que esta recomendación es orientativa y puede variar según la complejidad del terreno, el acceso a afloramientos y la escala específica del estudio (mayor escala, mayor densidad de observaciones). La integración de estos resultados permite identificar zonas con características deformativas más favorables para permitir la infiltración del agua.

7.2.2.10.2 Sugerencias para la cuantificación de la conectividad de redes de fractura en el campo

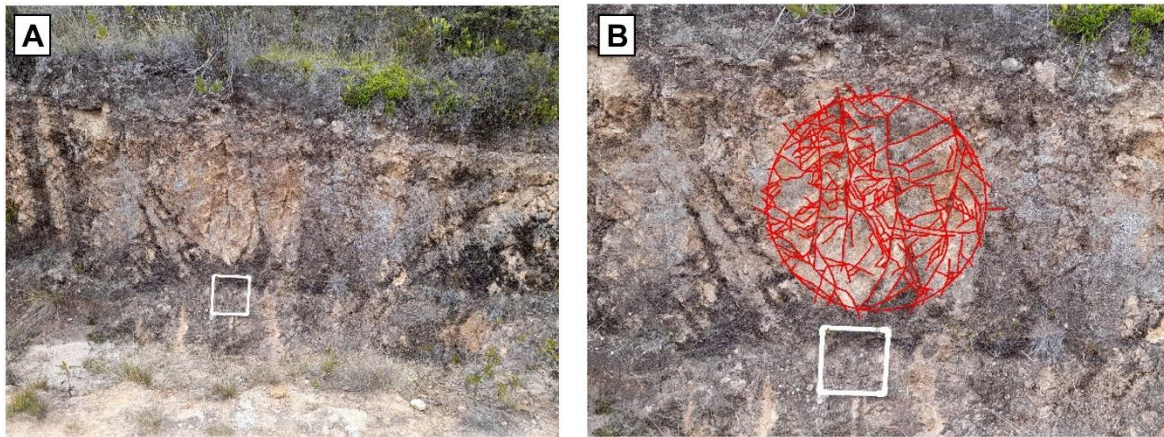
Como se ha mencionado, la conectividad es un parámetro útil para evaluar la capacidad que tiene una red de fracturas para transportar efectivamente el agua hacia el subsuelo. Su evaluación y cuantificación se realiza a través de las relaciones topológicas entre los elementos de la red de fracturas, definidas como las conexiones y relaciones espaciales entre objetos.

La implementación de la guía metodológica a escalas detalladas y semidetalladas debe involucrar la cuantificación y distribución espacial de la conectividad de las redes de fractura

a escala de afloramiento presentes en el área evaluada. La propuesta de evaluación de la conexión entre lineamientos descrita anteriormente es una extensión a escala regional de los métodos empleados para definir y cuantificar la conectividad de redes de fractura a mesoescala.

De esta manera, los métodos de campo parten de la proyección sobre el afloramiento de ventanas de muestreo, las cuales pueden ser rectangulares o circulares; para lo cual se deben tomar fotografías de la red de fractura debidamente escaladas, orientadas y capturadas en un eje aproximadamente perpendicular a la disposición del afloramiento (figura 25).

Figura 25 Método de la ventana circular



A: Fotografía orientada y debidamente escalada (el cuadrado mide 30cm de lado); B: Uso de ventana circular de radio conocido y digitalización de las fracturas con fines cuantitativos.

Posteriormente, se deben digitalizar todas las fracturas dentro de la ventana de muestreo, para lo anterior se sugiere el uso de programas SIG como ArcMap y QGis, en los cuales las fotografías deben ser cargadas debidamente escaladas, sin embargo, el uso del programa de edición será función de los medios con los cuales cuente el usuario de la guía metodológica.

El siguiente paso se relaciona con la caracterización de los elementos de la red de fracturas digitalizada. De manera general, una red de fracturas consiste en un sistema de ramas y

nodos, estos últimos son categorizados por Sanderson y Nixon (2015) en tres tipos: los nodos tipo I que corresponden a terminaciones aisladas de discontinuidades, los nodos tipo Y relacionados con terminaciones de una fractura en otra y los nodos tipo X que corresponden a intersecciones entre fracturas que se cruzan entre sí.

La proporción de los diferentes tipos de nodos permite la caracterización de la conectividad del patrón de fracturas, teniendo como premisa fundamental que redes que tengan mayor proporción de nodos tipo Y y X presentan mayor potencial para permitir la infiltración del agua. Manzocchi (2002) propone un diagrama ternario con los tipos de nodos (I, Y y X) en sus vértices, la posición de la red de fracturas dentro de este diagrama define su conectividad, así, los patrones de fractura con mayor conectividad tenderán a localizarse sobre la línea X-Y del gráfico.

Para la automatización de la categorización de los tipos de nodos dentro de la red evaluada, se sugiere el uso de la herramienta NetworkGT desarrollada por Nyberg et al. (2018), la cual es de acceso libre y está disponible para las plataformas ArcMap y Qgis. El uso detallado de la herramienta será especificado en el Manual SIG presentado como anexo.

La distribución espacial de la conectividad de los patrones de fractura permite la definición de zonas con mayor potencial para corresponder a zonas de recarga de acuíferos según este parámetro. Su extensión y espacialización se debe realizar mediante métodos geoestadísticos adecuados, teniendo en cuenta que debe existir una relación entre la conectividad de lineamientos y las redes de fractura, dada la naturaleza fractal del fracturamiento.

7.2.2.10.3 Métodos para la definición del espesor de la zona de daño de las fallas en el campo

Según Choi *et al.* (2016) las fallas frágiles pueden ser clasificadas en dos dominios estructurales principales; un núcleo de falla central y su zona de daño envolvente, separados de una roca encajante o protolito que presenta una deformación base.

El núcleo de la falla es el resultado de deformación interna altamente localizada e intenso cizallamiento que acomoda la mayor parte del desplazamiento dentro de las zonas de falla, y

generalmente se compone de un número de recurrentes superficies de deslizamiento y rocas de falla tales como harina de falla, cataclasitas y brechas (Choi et al., 2016).

La zona de daño se caracteriza por presentar una menor deformación interna relativa al núcleo de falla, y su amplitud se evidencia por la frecuencia y dimensión de las estructuras producto de la actividad de la falla, como grietas y diferentes tipos de fracturas, incluidas bandas de deformación, fracturas subsidiarias, venas, clivajes de cizalla, entre otros (Choi et al., 2016; Gómez- Hurtado et al., 2022).

La distribución de permeabilidad en una zona de falla está zonificada, alcanzando valores máximos en la zona de daño y valores menores en el núcleo adyacente, siendo mayor que la del protolito para ambos casos (Curzi et al., 2023), de esta manera, el comportamiento hidráulico de una zona de falla está gobernado por la proporción núcleo- zona de daño (Caine et al., 1996).

Dado lo anterior, cuando se aplique la guía metodológica en escalas grandes y medianas (mayores de 1:100.000), se hace necesaria la definición detallada y objetiva del espesor de la zona dañada.

Teniendo en cuenta que la frecuencia de ocurrencia de las características asociadas a la zona de daño disminuye a medida que la distancia con respecto al núcleo de falla aumenta, Choi et al. (2016) proponen una metodología basada en la medición de la frecuencia de fracturas por unidad lineal en un transecto cortando la estructura transversalmente y graficar estos datos en histogramas de frecuencia con el eje Y representando el número de fracturas sobre unidad de longitud y el eje X la distancia con respecto al núcleo de la falla. El límite de la zona de daño estará definido por un incremento en la frecuencia de fracturas con respecto a la deformación de fondo asociada al protolito.

Estos mismos autores mencionan que dadas las limitaciones de los histogramas relacionadas con la resolución de las variaciones de frecuencia, se deben realizar diagramas de frecuencia acumulada con respecto a la distancia al núcleo de la falla; la pendiente de la frecuencia acumulada indica cambios en la densidad de las estructuras asociadas a la zona de daño, permitiendo una mejor delimitación de ésta reduciendo las inconsistencias en su definición.

Para detalles sobre la metodología y los resultados en casos de estudio, se sugiere consultar los artículos de Berg y Skar (2005) y Choi et al. (2016).

Dado que la exposición de las zonas de falla es discontinua y que la cuantificación de la frecuencia de elementos asociados a las mismas se complica, se puede obtener una aproximación al espesor de la zona de daño dada la distribución espacial de los datos de intensidad y densidad del fracturamiento calculados en la fase de análisis cuantitativo del fracturamiento. Si la densidad del muestreo es adecuada, los mayores valores de densidad e intensidad de fracturas se dispondrán en torno a las principales estructuras mapeadas y a los rasgos lineales interpretados; esta distribución da indicios sobre los límites de sus zonas de daño.

7.2.2.11 Consideraciones de la implementación de la variable incidencia geoestructural a escala 1:25,000

Con base en los datos de campo levantados siguiendo las sugerencias anteriormente expuestas, el usuario de la guía metodológica puede realizar una cartografía detallada de los elementos estructurales frágiles presentes en la zona evaluada.

La distribución espacial de la intensidad, densidad y conectividad de las redes de fractura, aunadas a las aberturas cuantificadas de manera adecuada, permite identificar zonas con mayor potencial para favorecer la infiltración del agua, esto mediante la integración de técnicas geoestadísticas robustas que permitan la interpolación de los datos teniendo en cuenta la presencia de las fallas identificadas, para obtener una superficie continua que represente de manera idónea las características cuantificadas de la red de fracturas.

Se sugiere consultar el trabajo de Escuder- Viruete y Lorenzo- Álvarez (2002) en el que se realiza un análisis geoestadístico del índice de fracturamiento cuantificado en campo con técnicas similares a las sugeridas en la presente guía.

Además, mediante la identificación de los espesores de las zonas de falla y su jerarquización, el usuario de la guía puede caracterizar la arquitectura tridimensional de las estructuras y

establecer posibles líneas de flujo del agua subterránea a través de la integración de datos geométricos, aberturas y mayores espesores.

Como resultado de la aplicación de las consideraciones anteriormente expuestas, se obtienen mapas y superficies continuas que evidencian a una mayor escala el control que las estructuras frágiles ejercen sobre la infiltración, los cuales serán los insumos base para la aplicación de la metodología a escalas detalladas.

Para conocer más detalles sobre las metodologías usadas en el Servicio Geológico Colombiano para describir las estructuras deformativas, realizar la cartografía de los elementos estructurales y la adquisición y representación gráfica de los datos en campo, se sugiere la consulta de los trabajos presentados por Forero *et al.* (2021), López- Isaza *et al.* (2021) y Suárez *et al.* (2021).

8. Proceso de identificación de las potenciales zonas de recarga, mediante álgebra de mapas

La infiltración es una de las variables sobre las que existe menos consenso en cuanto a metodologías para estimarla (Healy , 2010). No obstante, es común el uso de técnicas hidrogeoquímicas (Vélez et al., 2008), hidrológicas (Ramírez-Granados, 2013; Herrera y Brown, 2011) o como se les podría denominar, técnicas basadas en modelos hidrogeológicos para medios parcialmente saturados (Terraë, 2023). Estos métodos suelen requerir un volumen considerable de información, desarrollos metodológicos complejos y un tiempo de implementación significativo. En consecuencia, su aplicabilidad se ve limitada en muchos casos, lo que lleva a recurrir a métodos basados en superposición de capas temáticas en el entorno de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) implícitamente relacionadas con el proceso de recarga, para definir zonas susceptibles a la infiltración (orientadas a la toma de decisiones articulables con algunas de las técnicas inicialmente mencionadas).

El objetivo, entonces, es considerar un conjunto de variables dependientes del espacio que estén vinculadas al proceso de recarga y que sean representativas de la variedad de ambientes del territorio, el cual presenta grandes contrastes geográficos, climáticos, geológicos,

edafológicos, entre otros. Dichas variables han sido analizadas en secciones anteriores del documento y, en una primera etapa, han sido llevadas a una misma escala.

Este conjunto de variables se combina para construir una nueva variable que refleja la susceptibilidad a la infiltración. En este sentido, algunos autores definen pesos específicos de manera subjetiva con los que se combinan las variables (Matus et al., 2009; Senanayake et al., 2015; Hsin-Fu Yeh et al., 2008; Hammouri et al., 2014), o bien utilizan métodos para abordar problemas multicriterio tradicionales, como el Proceso analítico jerárquico (PAJ) (Ranjana y Sindhu, 2014) o el método basado en grafos de interrelación (Hsin-Fu Yeh, 2016). También existen metodologías que se enfocan en caracterizar los primeros metros del perfil y obtener una estimación promedio de este, como propone Andres (1991).

Entonces, la guía metodológica para la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos plantea un problema de decisión multicriterio, definido como un conjunto de técnicas orientadas a asistir en los procesos de toma de decisiones cuyo fin último es investigar un número de alternativas bajo la luz de múltiples criterios y objetivos en conflicto Delgado y Cano (2005).

Delgado y Cano (2005) definen un criterio como cierta base para la toma de una decisión, esta puede ser medida y evaluada, por lo tanto, es la evidencia sobre la cual se basa una decisión. A su vez, las alternativas son las opciones que tiene el decisor para la toma de la decisión. En el caso de la propuesta contemplada en este documento, los criterios que condicionan la toma de la decisión corresponden a los juicios de valor emitidos sobre las cinco variables anteriormente mencionadas, por lo tanto, las alternativas están condicionadas a la superposición final de los mapas (**Figura 26**) que a su vez dependen de los factores de ponderación que indican la importancia relativa de las capas criterio en el proceso de decisión. En ese sentido, la obtención del nivel de adecuación de cada alternativa se halla sumando el resultado de multiplicar el valor de cada criterio por su peso.

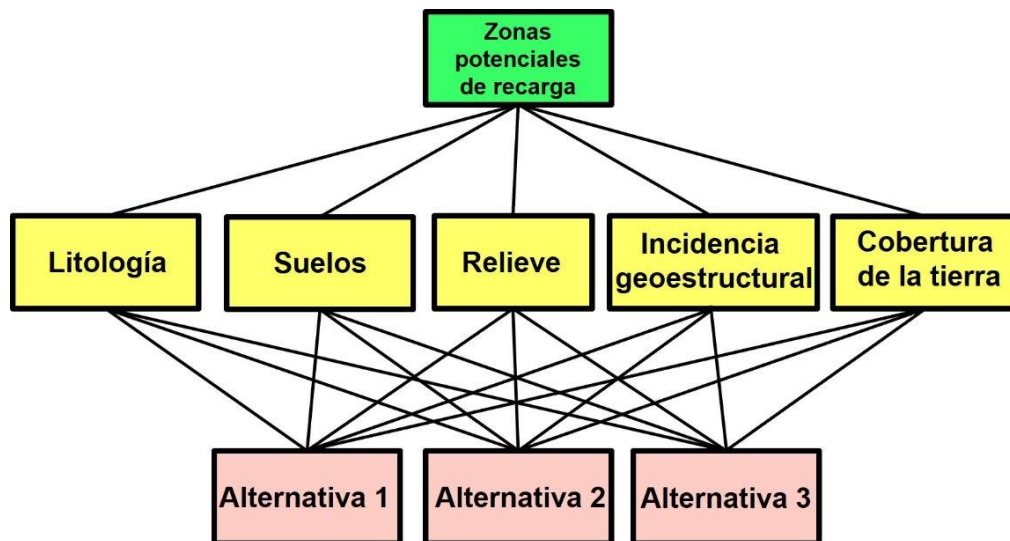


Figura 26. Esquema que ilustra el análisis multicriterio que plantea la guía metodológica. Nótese que la alternativa elegida depende de las relaciones entre las capas criterio

Dado que la decisión sobre la alternativa que mejor representa las zonas potenciales de recarga en el área evaluada es sensible a las ponderaciones de los criterios y que las variables corresponden a datos ráster lo cual genera una cantidad ingente de alternativas dada la cantidad de filas y columnas que presentan las capas temáticas; se hace necesario encontrar un método de ponderación que disminuya el efecto de la subjetividad en el proceso de decisión y que además permita involucrar el criterio o el conocimiento del proceso evaluado del usuario de la guía. Lo anterior teniendo en cuenta que determinar los factores de ponderación de los criterios es uno de los problemas clave que surgen en la decisión multicriterio (Dragan et al., 2018).

La generación de los pesos de los criterios se refiere a la asignación de valores que cuantifican la importancia de cada criterio o su contribución relativa en el análisis de las alternativas (Costa et al., 2024). En ese contexto, Delgado y Cano (2005) mencionan que no existe un método generalmente aceptado para su determinación y Odu (2019) realiza una compilación de los principales métodos utilizados, presentando una síntesis de los procedimientos clasificados en subjetivos, objetivos e integrados.

En el contexto de la aproximación a la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos el análisis de decisión multicriterio usando el proceso analítico jerárquico (AHP)

es el método más común y mejor conocido (Arulbalaji et al., 2019), de igual forma, modelamientos basados en métodos de estadística multivariada como el análisis de componentes principales (ACP) y regresiones lineales múltiples han sido utilizados para identificar los parámetros clave que gobiernan la recarga de agua subterránea (ej. Zhu y Wang, 2016).

De igual forma, con el fin de limitar los eventuales sesgos en el proceso de toma de decisiones se pueden considerar otro tipo de aproximaciones, como la inferencia bayesiana y la optimización; la ventaja de estos métodos radica en la facilidad para incorporar datos evidenciados en campo, como los manantiales, que corresponden a zonas con baja susceptibilidad a la infiltración (ej. Achieng y Zhu, 2021).

En el caso de optimización relacionado con métodos de programación lineal, los puntos de agua asociados a manantiales ofrecen una restricción a los factores de ponderación de los criterios, consideración que es útil al momento de verificar los resultados obtenidos al aplicar la metodología planteada.

Los detalles de los métodos de ponderación considerados en la presente guía metodológica serán desglosados más adelante en el documento.

8.1 Análisis estadístico exploratorio y proceso físico

Se realizó un análisis estadístico exploratorio en diferentes casos de estudio con el objetivo de entender y resumir las características principales de los datos asociados a los criterios considerados, así como para identificar patrones, tendencias y relaciones para orientar análisis posteriores o la toma de decisiones en el contexto de las alternativas, a continuación, se presentan algunos resultados obtenidos.

En esta sección, se busca estudiar el comportamiento de las variables consideradas para estimar la susceptibilidad a la recarga y cómo se relacionan con el proceso de infiltración. Dentro de estas variables, se encuentran algunas de tipo continuo, como:

- Índice topográfico de humedad (TIF)

- Densidad de lineamientos (DNL)
- Conectividad de lineamientos (CONL)
- Densidad de drenaje (DD)

También se dan variables de tipo discreto, como:

- Litología (LIT)
- Cobertura (COB)
- Suelos (SUE)

Dado que el proceso no puede medirse directamente, se debe estimar de manera indirecta. Por ello, además de considerar el valor de cada variable, se ha analizado su varianza y su correlación con las demás variables. Para estudiar este comportamiento, se han examinado los histogramas unidimensionales de cada variable, así como los histogramas bidimensionales entre pares de variables. En este análisis se ajustó el tamaño de los intervalos de clase para poder observar mejor los patrones de distribución de las variables discretas. En la diagonal de los histogramas se pueden ver las distribuciones unidimensionales de cada variable.

El primer caso de estudio corresponde a las cuencas de los ríos Suratá y Tona, cuya parte alta pertenece a la jurisdicción del páramo de Santurbán. Una cuenca en donde se ha identificado el efecto del fracturamiento en los flujos de agua subterránea (Cañas et al. 2022) y con presencia preponderante de rocas cristalinas.

Es evidente que el uso de variables categóricas representa un reto, sin embargo, los histogramas de las variables cobertura, litología y suelos muestran patrones similares a distribuciones gamma y exponenciales.

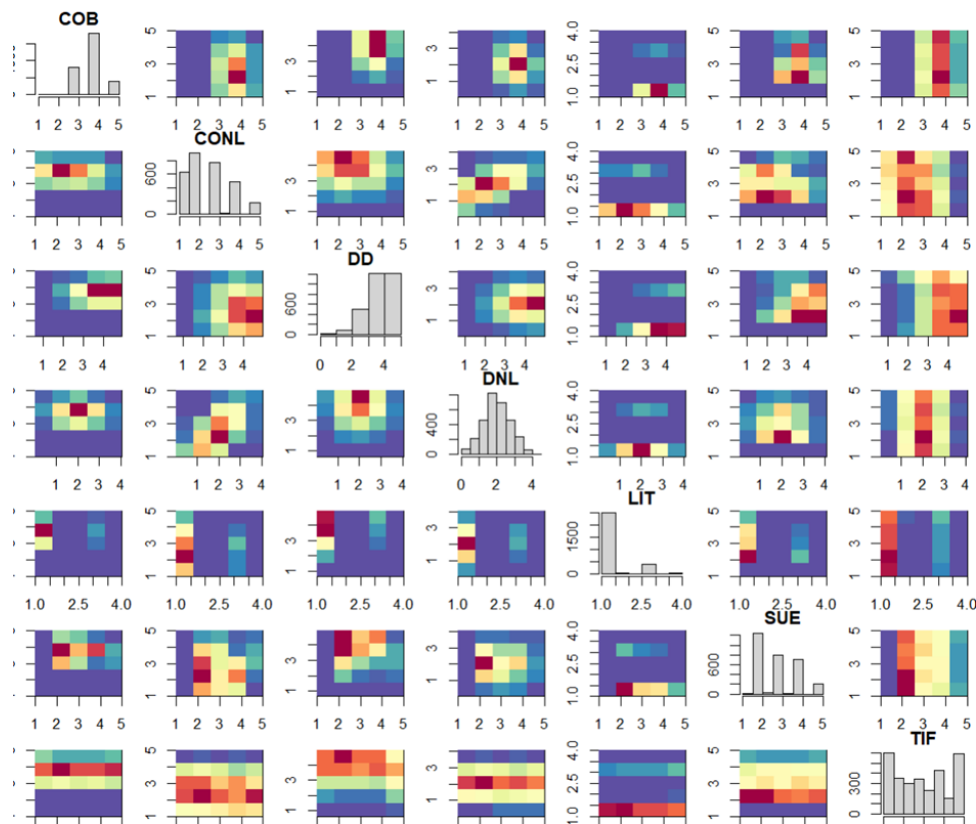


Figura 27. Histogramas de correlación entre pares de variables fuera de la diagonal, y en la diagonal el histograma de cada variable para las cuencas de los ríos Suratá y Tona

En cuanto a las correlaciones, dejando de lado la litología, entre los pares de variables se observa cierta correlación. Por ejemplo, se puede observar el comportamiento de la conectividad de lineamientos y la densidad de lineamientos, o también la densidad de drenaje con los suelos (esta última variable es discreta). Sin embargo, las variables litología e ITH revelan algunas de las limitaciones del uso de la correlación. En particular, la litología presenta dos categorías predominantes, lo que dificulta el establecimiento de una correlación clara, ya que los datos se acumulan en bandas. Por otro lado, el índice topográfico de humedad tiene una distribución uniforme, por lo que los datos tienden a distribuirse a lo largo de todo el rango, dificultando la identificación de un patrón de distribución claro.

Estos dos comportamientos ilustran una limitación importante: las variables categóricas no pueden ser homogéneas, ya que en muchos casos no presentan varianza. En el caso extremo, si una variable solo tiene una categoría, se pierde la información que aporta esa variable.

Incluso en el caso de litología, aunque tiene cuatro categorías, solo dos de ellas aportan información relevante al proceso. Por lo tanto, un límite mínimo para que una variable sea útil es que tenga al menos dos categorías.

Como ejemplo, en la siguiente figura se muestra el comportamiento de la correlación de variables para el caso de estudio del Valle del Cauca en zona de depósito cuya información de base proviene parcialmente del estudio de zonas de recarga de la Universidad del Valle y la CVC (Univalle y CVC, 2023). En este caso, la litología tiene una mayor representación, lo que permite extraer más información de su distribución de probabilidad. Es interesante observar el cambio en las variables asociadas a la hidrología, como el índice topográfico de humedad, el cual presenta una distribución de probabilidad normal con un sesgo. Además, se observa que la conectividad de lineamientos sigue un patrón de distribución uniforme.

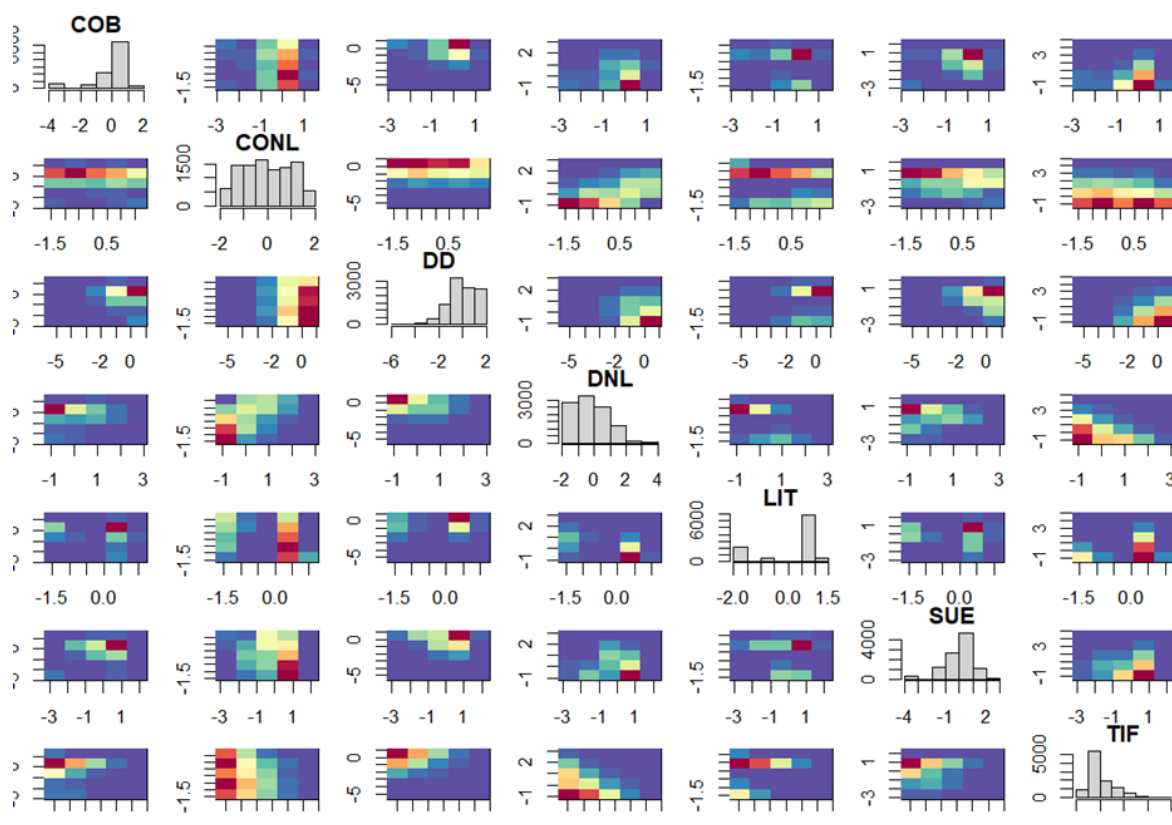


Figura 28. Histogramas de correlación entre pares de variables fuera de la diagonal, y en la diagonal el histograma de cada variable para el caso de Valle del Cauca

Con base en estos resultados y otros casos de estudio se concluye que:

1 - Las variables siempre presentan algún grado de correlación, en particular se refuerza el hecho de la correlación entre los pares de variables densidad y conectividad de lineamientos, suelos e índice topográfico de humedad y suelos - densidad de drenaje.

2. La varianza en la densidad de lineamientos y la conectividad de lineamientos disminuye cuando el medio no está influenciado por procesos de flujo preferencial a través de fracturas. En este contexto, otras variables se vuelven más relevantes para el análisis y deben ser consideradas en la evaluación del sistema.

3 - Debido a la escala de la guía, se debe garantizar una variabilidad mínima en las variables categóricas. Por ello, es recomendable considerar, al menos, la existencia de dos variables categóricas. Este requerimiento se debe, en parte, a la incertidumbre asociada con las capas de entrada, lo cual se refleja en la pérdida significativa de información. Esta limitación implica que los métodos objetivos propuestos en la guía podrían tener restricciones en su aplicación debido a la pérdida de datos esenciales.

8.2 Sumatoria lineal ponderada de los criterios para la definición de zonas potenciales de recarga.

La guía metodológica plantea la integración de un método subjetivo que involucre el criterio experto del usuario a través de una comparación por pares dentro del contexto del método de las jerarquías analíticas (MJA) y un método objetivo basado en la correlación intercriterio y la desviación estándar individual (CRITIC), en el entorno de los SIG. El resultado de la integración consiste en seleccionar la alternativa que mejor adecuación espacial presenta para describir las zonas potenciales de recarga en el área evaluada, la cual ha de someterse a verificación según los datos hidrogeológicos directos con los que cuente el usuario (ej. distribución de manantiales, datos de hidrogeoquímica e isotopía, productividad de pozos en el área, etc.).

A continuación, se hará la descripción detallada de los dos métodos elegidos para su aplicación.

8.3 Método objetivo. Importancia de los criterios a través de la correlación intercriterio (CRITIC).

El método CRITIC fue definido para el apoyo en la toma de decisiones multicriterio en el ámbito financiero por Diakoulaki et al., (1995) con el fin de establecer un método que permitiera la definición de pesos objetivos derivados de la cuantificación de la información intrínseca de cada criterio.

Diakoulaki et al., (1995) mencionan que los atributos (criterios) pueden ser vistos como fuente de información y que los pesos relacionados con su importancia reflejan la cantidad de información contenida en cada uno de ellos. A su vez, estos autores introducen una segunda dimensión al concepto de información que denominan conflicto entre los diferentes atributos, argumentando que un proceso de decisión multicriterio en el cual el desempeño de las alternativas en todos los criterios de evaluación está en completa concordancia no representa ningún interés y la elección es evidente.

Dado lo anterior, el método se basa en la desviación estándar de cada criterio y usa un análisis de correlación para cuantificar su valor (Odu, 2019). De esta manera, la desviación estándar en el proceso de toma de decisiones se relaciona con el contraste de intensidad, a su vez, el grado de correlación se relaciona con el conflicto entre los criterios de decisión (Diakoulaki et al., 1995).

Así, la premisa fundamental de la que parte el método es que criterios con mayor desviación estándar y menor correlación con los demás, presenta un mayor valor en el proceso de decisión multicriterio, ya que, al tener mayor intensidad y menor conflicto, aporta más información a las alternativas.

A continuación, se sintetizan los pasos metodológicos presentados por Diakoulaki et al. (1995) y su aplicación en la guía metodológica para la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos. Los detalles del uso de los programas SIG y su aplicación serán detallados en el manual anexo a este informe.

El primer paso consiste en llevar los criterios (litología, cobertura, infiltración en el suelo, densidad y conectividad de lineamientos, densidad de drenaje e índice topográfico de humedad) a escalas comparables considerando que las variables originales se encuentran en medidas y unidades diferentes (por ejemplo, la densidad de drenaje se encuentra en km/km²).

Para los criterios continuos (densidad de drenaje, ITH, densidad de lineamientos y conectividad de lineamientos) se usa la siguiente fórmula:

- **Ecuación 4** Criterio de escalado

$$X_j = \frac{(X - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})}$$

Donde: X_j = valor del criterio escalado, X_{\min} = valor mínimo del criterio original, X_{\max} = valor máximo del criterio original.

El escalado, sin embargo, requiere evaluar previamente la presencia de datos **anómalos o atípicos**, los cuales podrían indicar insumos inadecuados o errores en el procesamiento. Se recomienda, entonces, realizar una verificación de la consistencia lógica de los rangos de valores y de los patrones espaciales.

Por ejemplo, las densidades físicas no pueden tener valores negativos. En el caso del Índice Topográfico de Humedad (ITH), la presencia de valores negativos es teóricamente improbable para resoluciones de 12.5 m o 30 m, salvo que se cumpla la condición $\alpha < \tan(\beta)$, lo cual implicaría pendientes extremas superiores a 85° (considerando un área acumulada mínima del tamaño del píxel). Del mismo modo, para la conectividad, los valores difícilmente deberían ser inferiores a 0. Adicionalmente, el profesional debe validar que el patrón espacial no presente artefactos geométricos derivados de un mal procesamiento del DEM base o insumos inadecuados.

En cuanto a los valores máximos, dado que las distribuciones de probabilidad de estas variables continuas rara vez se ajustan a una distribución normal, se sugiere fijar un límite superior basado en métodos robustos (ver Turkey(1977)). Un criterio clásico para definir este umbral es el uso del rango intercuartílico (IQR), la idea de ese método es marcar un

limite por debajo del cual se encuentra la mayor cantidad de datos, en este sentido dada la distribución de los datos se ha definido como valor para filtrar **las variables el percentil 95%** (justificado en la idea de usar el IQR en las distribuciones normales).

Luego de retirados los datos atípicos, se debe rellenar los huecos, en la guía SIG se encuentran algunas metodologías para lograrlo, pero el proceso busca rellenar los valores con el valor umbral asociado al percentil 95%.

Para los criterios categóricos se deben usar los valores de reclasificación mostrados en la tabla

Tabla 17. Valores de reclasificación asociados a los criterios categóricos

Valor original	Valor escalado
5	1
4	0.75
3	0.5
2	0.25
1	0

Esto, teniendo en cuenta que para estos criterios los valores máximos y mínimos teóricos siempre corresponden a 5 y 1 respectivamente, por lo cual, el rango ubicado en el denominador de la Ecuación 4 siempre será igual a 4; lo anterior tiene como objetivo evitar distorsiones debido al escalamiento en áreas en donde estos criterios no ocupen el rango teórico completo (1 a 5).

Lo anterior se fundamenta en una función de pertenencia que restringe los valores en el intervalo $[0,1]$ basada en el concepto del punto ideal (Diakoulaki et al., 1995).

Es importante resaltar que, al ser un método fundamentado en parámetros estadísticos, los criterios a utilizar corresponden a las variables que contemplan los subcomponentes originales, de esta manera, la densidad y conectividad de lineamientos, la densidad de drenaje y el índice topográfico de humedad (ITH), al ser variables continuas, se tratan independientemente en este método de ponderación.

Con los subcomponentes en la misma escala, se deben calcular la matriz de correlación entre los criterios y la desviación estándar individual. Esto con el fin de hallar el contraste de intensidad y el conflicto entre la información.

La matriz de correlación corresponde a una matriz cuadrada, con igual número de filas y columnas correspondientes a los criterios, simétrica, de diagonal unitaria y con los coeficientes de correlación lineal en cada casilla. Para hallar la matriz de correlación se pueden usar programas de acceso libre como R, QGIS o licencias de ArcMap. La **Tabla 18** corresponde a un ejemplo de la matriz de correlación calculada para un área ubicada en el abanico del Quindío y alrededores.

Tabla 18. Ejemplo de matriz de correlación entre los criterios para el área del abanico del Quindío. Nótese la diagonal unitaria y la simetría de la matriz

CRITERIOS	Litología	Suelos	Cobertura	Densidad de lineamientos	Conectividad de lineamientos	Densidad de drenaje	ITH
Litología	1	-0,09	-0,25	-0,5	-0,42	-0,13	0,16
Suelos	-0,09	1	0,14	0,15	0,13	0,07	-0,03
Relieve	-0,25	0,14	1	0,26	0,23	0,02	-0,03
Densidad de lineamientos	-0,5	0,15	0,26	1	0,9	0,17	-0,16
Conectividad de lineamientos	-0,41	0,13	0,23	0,89	1	0,17	-0,14
Densidad de drenaje	-0,13	0,06	0,02	0,17	0,17	1	-0,17
ITH	0,16	-0,03	-0,03	-0,17	-0,14	-0,17	1

La tabla 2 muestra las desviaciones estándar calculadas para los criterios en la misma área.

Tabla 19. Desviaciones estándar calculadas para los criterios en el área del abanico del Quindío

CRITERIOS	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
Litología	0,31
Infiltración en el suelo	0,25
Cobertura	0,25
Densidad de lineamientos	0,20
Conectividad de lineamientos	0,17
Densidad de drenaje	0,16
ITH	0,12

Posteriormente se debe calcular la cantidad de información (C_j) que cada criterio aporta al proceso evaluado. Recordemos que un criterio con mayor cantidad de información tendrá una mayor ponderación dado que no es redundante y presenta mayor intensidad.

La cantidad de información viene dada por la siguiente ecuación:

- **Ecuación 5** Cantidad de información del criterio

$$C_j = \sigma_j * \sum_{k=1}^n (1 - r_{jk})$$

Donde: C_j = cantidad de información del criterio

σ_j = desviación estándar del criterio

r_{jk} = coeficientes de correlación con los demás criterios

Los resultados obtenidos para el área del abanico del Quindío se muestran en la **Tabla 20**.

Tabla 20. Cantidad de información para cada criterio en el abanico del Quindío

VARIABLES	LITOLÓGIA	INFILTRACIÓN EN EL SUELO	COBERTURA	DENSIDAD DE LINEAMIENTOS	CONECTIVIDAD DE LINEAMIENTOS	DENSIDAD DE DRENAJE	ITH
Cj	2,26	1,38	1,76	1,28	1,6	1,44	2,0

Finalmente, para obtener los pesos objetivos los valores anteriores deben ser normalizados a la unidad, siguiendo la siguiente fórmula:

- **Ecuación 6** Peso del criterio

$$W_j = C_j / \sum_{k=1}^n C_k$$

Donde: Wj = peso del criterio

Cj= cantidad de información de cada criterio individual

$\sum_{k=1}^n C_k$ = sumatoria de la cantidad de información los criterios

En el caso del abanico del Quindío, los criterios que mayor valor tienen son litología, índice topográfico de humedad (ITH) y cobertura (**Tabla 21**), lo cual es coherente con las características hidrogeológicas del área de estudio, correspondiente a un área de topografía principalmente baja y constituida por depósitos cuaternarios fluvio-volcánicos, en los cuales la incidencia geoestructural es baja.

Tabla 21. Factores de ponderación finales para el área del abanico del Quindío

CRITERIOS	LITOLOGÍA	INFILTRACIÓN EN EL SUELO	COBERTURA	DENSIDAD DE LINEAMIENTOS	CONECTIVIDAD DE LINEAMIENTOS	DENSIDAD DE DRENAJE	ITH
Factor de ponderación	0,19	0,12	0,15	0,11	0,14	0,12	0,17

8.4 Método subjetivo. Proceso Analítico Jerárquico (PAJ).

El proceso analítico jerárquico (PAJ) fue introducido en los años 70 del siglo pasado por T.L Saaty y ha sido aplicado en numerosas ramas del conocimiento como un método cuantitativo que apoya la toma de decisiones. Corresponde a una teoría general de la cuantificación que es usada para derivar escalas de proporciones tanto para comparación por pares discretas como continuas (Saaty, 1987). Se basa en la descomposición, juicio comparativo y síntesis de las prioridades del problema de decisión (Malczewski, 1999).

Los factores de ponderación son resultado de la comparación de la importancia relativa de cada uno de los parámetros con respecto al proceso evaluado según una calificación cualitativa fundamentada en juicio experto. Dado lo anterior, el problema de decisión ha de ser descompuesto en una jerarquía que capte sus elementos esenciales (Gómez- Delgado y Barredo - Cano, 2005). La jerarquía entre los criterios se establece según el impacto que cada uno tenga sobre la infiltración del agua, así, un parámetro con un peso alto ilustra una capa con alto impacto, a su vez, un parámetro o criterio con un peso bajo ilustra una capa con un impacto pequeño sobre el potencial de agua subterránea (Arulbalaji et al., 2019).

Este método ayuda a integrar las capas temáticas al establecer la importancia relativa de los elementos de cada jerarquía siguiendo el método de comparación por pares. La importancia de cada criterio se establece siguiendo la escala de Saaty (**Tabla 22**), la cual permite traducir juicios cualitativos en valores cuantitativos para construir la matriz de comparación por pares.

Tabla 22. Escala de importancia relativa de Saaty

INTENSIDAD DE IMPORTANCIA	DEFINICIÓN	DETALLES
1	Igual importancia	La contribución de los dos criterios es igual
3	Moderada importancia de uno sobre otro	La experiencia y el juicio favorece moderadamente a un criterio sobre el otro
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorece fuertemente a un criterio sobre el otro
7	Importancia muy fuerte	Un criterio es fuertemente favorecido y su dominancia es demostrada en la práctica
9	Importancia extrema	La evidencia favorece a un criterio sobre el otro en el mayor orden posible de afirmación

INTENSIDAD DE IMPORTANCIA	DEFINICIÓN	DETALLES
2,4,6,8	Valores intermedios entre los dos juicios adyacentes	Cuando es necesario un compromiso

Fuente: Tomado y modificado de Saaty (1987).

La experiencia y conocimiento que el usuario de la guía tenga del sistema acuífero que se está evaluando toma una posición preponderante en esta parte del proceso, ya que las valoraciones relativas entre los criterios dependerán en gran parte de su juicio. Dado lo anterior, en zonas en donde se tengan rocas cristalinas cuya capacidad para permitir la infiltración está condicionada por la deformación frágil que las afecte y a su vez, por las características de las redes de fractura resultantes, se debe priorizar la variable incidencia geoestructural sobre las demás a la hora de determinar la importancia relativa de cada una en el proceso de recarga de acuíferos.

El resultado del proceso de comparación por pares de cada uno de los criterios será una matriz cuadrada ($n \times n$), con diagonal unitaria y recíproca, de la forma:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ 1/a_{13} & 1/a_{23} & 1 & \dots & a_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & 1/a_{3n} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Donde: A = es la matriz de comparación por pares de $n \times n$ en la cual a_{ij} son las alternativas con respecto a cada criterio, siendo n el número de parámetros comparados.

El usuario de la guía debe ser cuidadoso con las inconsistencias al formular la matriz de comparación por pares, ya que, la matriz debe cumplir un criterio de consistencia para que los factores de ponderación obtenidos sean representativos y cumplan con el objetivo. De esta manera, se espera que la matriz cumpla con los principios de reciprocidad y transitividad, este último relacionado con la coherencia entre las importancias relativas asignadas a cada criterio; como ejemplo: si el criterio C1 presenta mayor favorabilidad que el criterio C2 y este último mayor favorabilidad que el criterio C3, se espera que C1 tenga mayor importancia que C3, así, $C1 > C2 > C3$. De igual forma se debe tener coherencia con la proporcionalidad

entre las importancias relativas asignadas, por ejemplo, si C1 es 4 veces más importante que C2 y a su vez C2 es 2 veces más importante que C3, entonces se espera que C1 sea al menos 8 veces más importante que C3.

Los factores de ponderación derivados de la matriz de comparación por pares obtenida anteriormente se obtienen hallando el vector propio asociado al mayor valor propio ($\lambda_{\text{máx}}$) de la respectiva matriz. De igual forma, pueden ser hallados mediante la normalización de la matriz A dividiendo cada celda por la sumatoria de los valores de la columna a la cual está asociada, el factor de ponderación resultante corresponde al promedio de cada fila en la matriz resultante. Esta última aproximación funciona mejor para matrices con pocos criterios, sin embargo, cuando se requiere mayor precisión en la valoración, es recomendable usar el vector propio de la matriz para la obtención de los pesos.

Existen varias tablas de acceso libre que automatizan el proceso de obtención de los pesos mediante la aplicación del proceso analítico jerárquico (AHP), de igual forma, Goepel (2018) desarrolló una aplicación en línea que permite al usuario usar una calculadora para la obtención de sus pesos, para acceder y registrarse en la página web debe seguirse el siguiente enlace: <https://bpmsg.com/ahp/?lang=es>. Otra opción existente para realizar el proceso es el uso de programas especializados en estadística como el desarrollado por IBM SPSS y lenguaje de programación R.

Como anteriormente se mencionó, para que los factores de ponderación obtenidos mediante la jerarquía establecida por criterio experto tengan validez y representatividad, la matriz de comparación por pares debe ser consistente. Saaty (1987) describe el índice de consistencia (C.I.) de la matriz mediante la ecuación:

- **Ecuación 7** índice de constancia

$$C.I. = \frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{n - 1}$$

Donde, C.I corresponde al índice de consistencia, $\lambda_{\text{máx}}$ responde al mayor autovalor de la matriz de comparación por pares y n es el número de criterios evaluados.

A su vez, el radio de consistencia (C.R.) viene definido por:

- **Ecuación 8** Radio de constancia de matriz

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.}$$

Donde: C.R. corresponde al radio de consistencia de la matriz, C.I. es el índice de consistencia y R.I. es el índice de consistencia aleatoria, el cual corresponde a un valor utilizado por Saaty (1987) para medir la coherencia de las comparaciones hechas en una matriz de preferencias, que compara la consistencia observada en una matriz de decisiones con la consistencia que se obtendría si los valores fueran asignados al azar. La tabla 6 muestra los índices de consistencia aleatorios para matrices con hasta 10 criterios (Saaty, 1987).

Tabla 23. Valores de RI para diferentes números de criterios

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Fuente: Tomado de Saaty (1987)

El radio de consistencia mide el nivel de consistencia de la matriz de comparaciones. El valor que se considera aceptable debe ser menor a 0,1, todo valor de C.R. mayor requiere una revisión y ajuste de las importancias relativas asignadas a los criterios. Para toda matriz de comparación por pares diligenciada en el marco de la guía metodológica planteada debe realizarse el cálculo de la razón de consistencia, además su valor debe ser aceptable.

El resultado de este proceso serán factores de ponderación obtenidos según el criterio experto, la experiencia, el conocimiento de las características hidrogeológicas del área evaluada y el uso del razonamiento lógico del usuario de la guía metodológica.

8.5 Sensibilidad del método e importancia de un llenado inteligente

Con base en la explicación anterior sabemos las importancias relativas que se puede asignar y las celdas modificables en la matriz, mostradas en la **Figura 29** sobre la diagonal en colores. En esta sección se muestran los resultados de realizar simulaciones aleatorias de proceso de calificación con ciertas restricciones que veremos más adelante, todos esto con miras a entender los efectos que tiene en el llenado de la matriz. Los resultados se presentan en forma de diagramas de cajas para cinco criterios de análisis.

	[C1]	[C2]	[C3]	[C4]	[C5]	[C6]
[C1]	1	2	3	4	5	6
[C2]	7	8	9	10	11	12
[C3]	13	14	15	16	17	18
[C4]	19	20	21	22	23	24
[C5]	25	26	27	28	29	30
[C6]	31	32	33	34	35	36

Figura 29. Casillas de la matriz de comparación por pares usadas para las simulaciones

Una vez asignados los valores, una posible situación es que la tabla esté bien construida y, por lo tanto, el criterio de consistencia del método AHP se encuentre por debajo de 0,1. Esto, en principio, permite afirmar que la matriz sigue un proceso de transitividad y consistencia. Este proceso nos ha permitido evidenciar varias consideraciones sobre la sensibilidad del método AHP. En primer lugar, restringir la forma en que se asignan los valores en la tabla tiene un efecto notable en los resultados finales.

Por ejemplo, si asignamos valores aleatoriamente sobre la diagonal con una escala de 1 a 9, junto con sus respectivos inversos multiplicativos, lo que se obtiene al final se muestra en la **Figura 30**. En ella se puede observar que, para cada criterio, los pesos de ponderación finales suelen tener una probabilidad alta de ocurrir entre 0,08 y 0,32 (valores ubicados entre el 25 % y el 50 %), con valores extremos que oscilan entre 0 y 0,6.

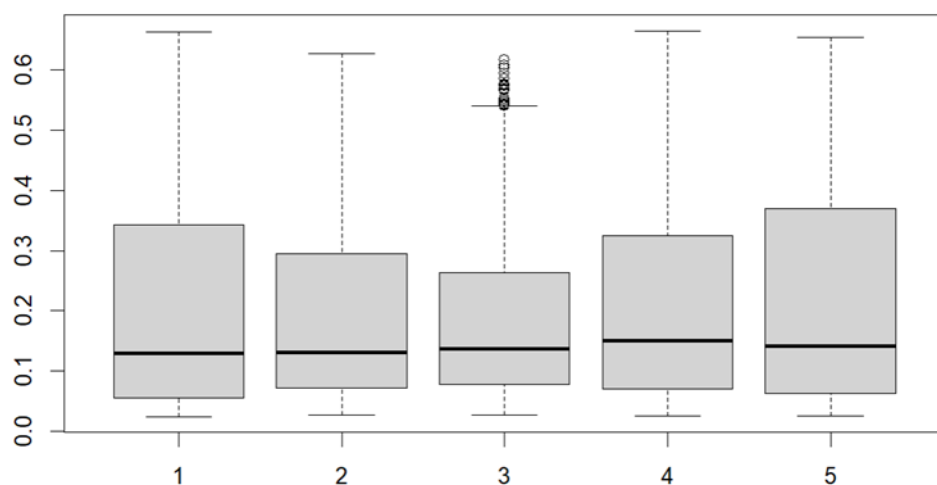


Figura 30. Diagrama de cajas de los pesos obtenidos por el método AHP, en el caso que los valores se asignen aleatoriamente

Si asignamos valores mayores a 1 en la tabla sobre la diagonal, se observa que los pesos obtenidos por el método AHP muestran una tendencia a jerarquizar los criterios. Es decir, el criterio con valores asignados mayores tenderá a obtener pesos mayores que los criterios con valores menores. Este comportamiento se ejemplifica en la figura (6), donde se han asignado valores aleatoriamente (siempre mayores a 1) sobre la diagonal.

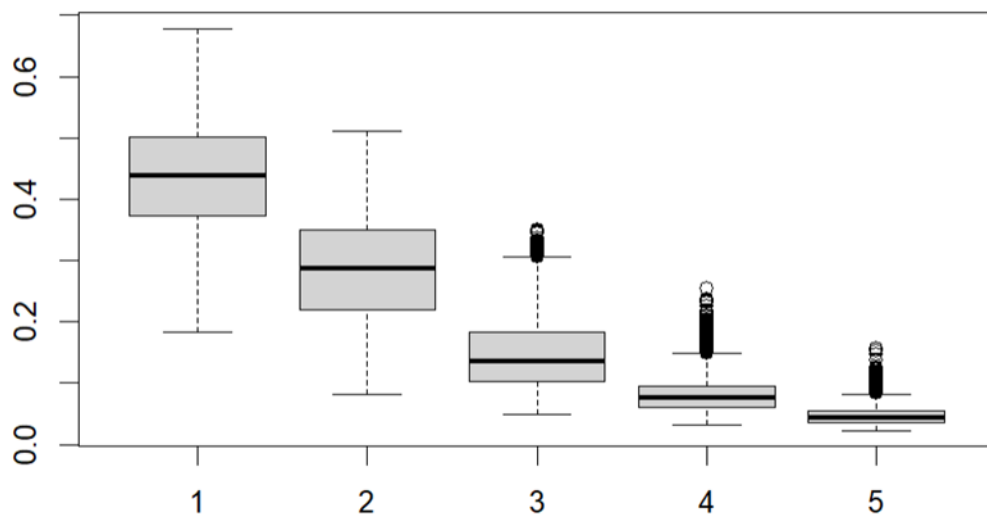


Figura 31. Diagrama de cajas de los pesos obtenidos por el método AHP, en el caso que los valores se asignen siempre mayores que 1 sobre la diagonal.

Por último, si se prioriza uno de los criterios durante la calificación, es decir, si siempre se asigna un valor mayor de 1 en comparación con los otros criterios, dicho criterio obtendrá los mayores valores de ponderación al finalizar el proceso AHP (**Figura 32**).

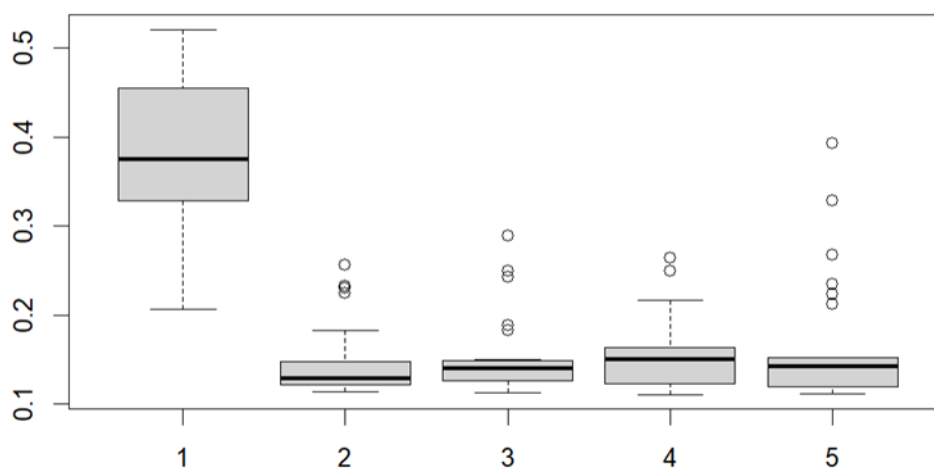


Figura 32. Diagrama de cajas de los pesos obtenidos por el método AHP.

En el caso que los valores se asignen siempre sea de mayor importancia que las demás variables – implícitamente colocarla en la primera fila y siempre darle valores mayores de 1

Esto resalta un aspecto importante de la metodología multicriterio, e implícitamente se relaciona con el análisis exploratorio de las variables, o sea, los criterios tienen una importancia y esta se debe fijar responsablemente y orientada por el análisis de los datos y el conocimiento que se tenga del área evaluada.

8.6 Integración aditiva de ambos métodos

Los métodos objetivos desarrollados para apoyar la toma de decisiones se basan en la estructura interna de los datos que conforman los criterios, su variabilidad estadística y correlación. Lo anterior permite obtener una base cuantitativa sólida para establecer los

factores de ponderación evitando sesgos relacionados con subjetividades y reflejando patrones reales en la distribución estadística de los datos.

A su vez, los métodos subjetivos al estar fundamentados en el juicio experto enraizado en el conocimiento hidrogeológico del sistema evaluado permiten captar relaciones y procesos físicos naturales que la mera distribución estadística de los datos no evidencia, siendo así una herramienta poderosa para asignar factores de ponderación sustentados en las características del contexto específico.

Teniendo en cuenta que ambos métodos **presentan** limitantes, relacionadas con el sesgo y la representatividad hidrogeológica de los parámetros estadísticos, se hace necesario desarrollar un método de integración que capture las bondades de las dos metodologías y a su vez encuentre un equilibrio entre la precisión estadística y el contexto hidrogeológico.

Para tal fin, en la presente guía metodológica se propone integrar los dos factores de ponderación hallados de manera objetiva y subjetiva, mediante una síntesis aditiva ponderada o un promedio de ambos pesos, de la siguiente manera:

- **Ecuación 9** Peso final del criterio

$$Wi = 0,5 \cdot Wiobj + 0,5 \cdot Wisub \quad \text{o} \quad Wi = \frac{Wiobj + Wisub}{2}$$

Donde, Wi es el peso final del criterio, $Wiobj$ corresponde al peso del criterio obtenido mediante el método CRITIC y $Wisub$ es el peso del criterio obtenido mediante el método PAJ.

Los valores así obtenidos serán los usados en la sumatoria lineal ponderada de las capas criterio.

8.7 Sumatoria lineal ponderada

La identificación de las zonas potenciales de recarga viene dada por la sumatoria lineal ponderada de los criterios en formato ráster utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) a través de un proceso de álgebra de mapas.

Para lo anterior, las capas temáticas deben tener la misma extensión y resolución espacial (para el caso de que la guía se aplique a escala 1:100.000 el tamaño de píxel debe ser de 30m × 30m) y deben estar calificadas en función de su probabilidad de recarga.

El índice de recarga para cada píxel viene dado por la siguiente fórmula:

- **Ecuación 10** Índice de zona potencial de recarga

$$IZPR = \sum_{j=1}^7 W_j * S_j$$

Donde, IZPR corresponde al índice de zona potencial de recarga que evidencia la potencialidad de cada celda para favorecer el proceso de recarga de acuíferos, j responde al número de criterios, W_j es el peso individual de cada criterio determinado mediante la integración de los métodos anteriormente descritos y S_j corresponde al ráster de cada criterio calificado en función del potencial de recarga.

El resultado de esta combinación debe ser reclasificado en cinco categorías: 5 muy alto potencial de recarga, 4 alto potencial de recarga, 3 medio potencial de recarga, 2 bajo potencial de recarga y 1 muy bajo potencial de recarga.

Lo anterior sugiere que el resultado de la combinación es relativo a las características hidrogeológicas del área de estudio y por tanto las zonas obtenidas en diferentes contextos no pueden ser comparadas directamente.

La **Figura 33** presenta un flujograma en el que se resumen los pasos metodológicos definidos para la identificación de las zonas potenciales de recarga de acuíferos.

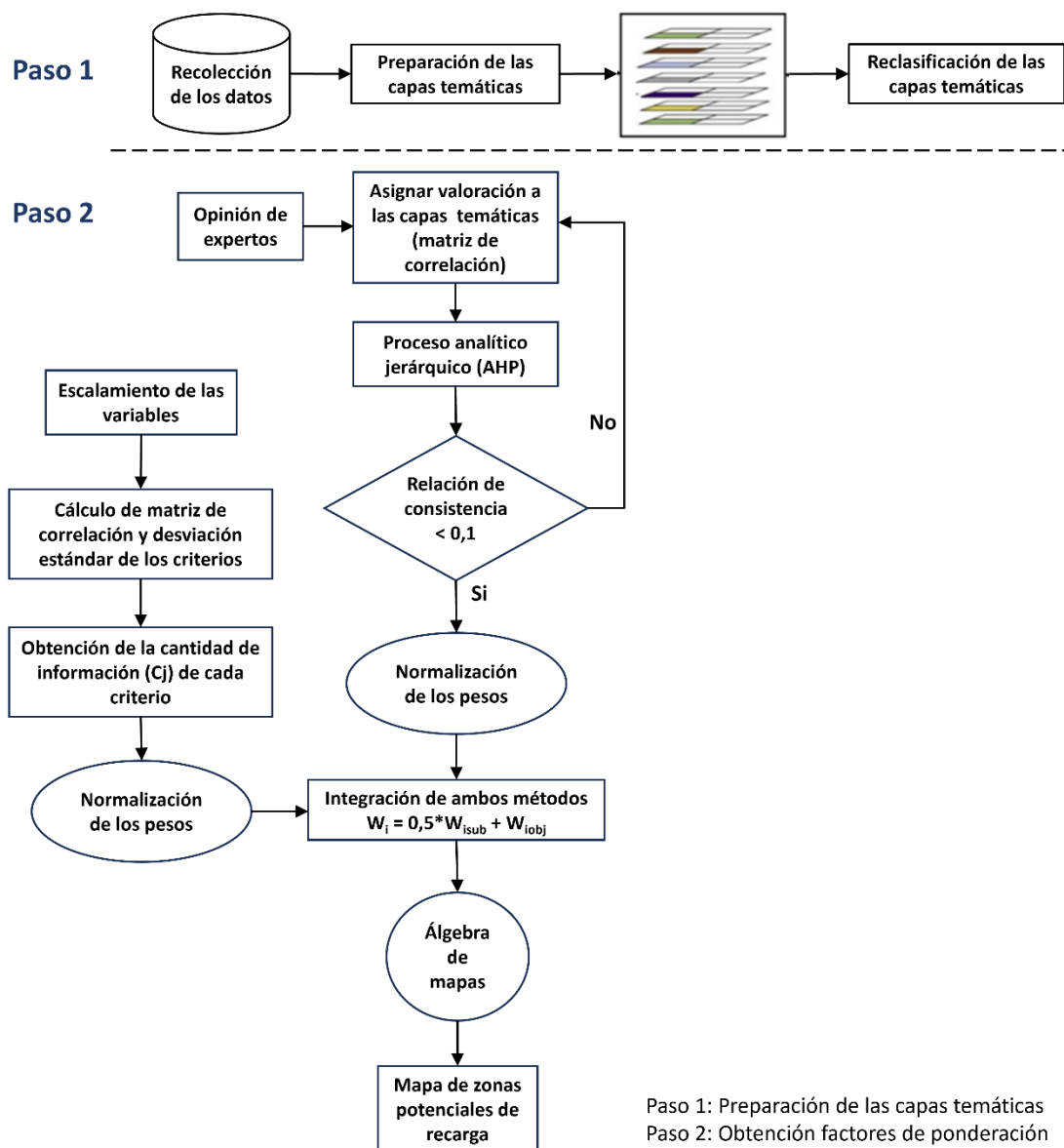


Figura 33. Flujograma que resume los pasos metodológicos propuestos en la presente guía para la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos

La metodología se divide en dos secciones. El primer conjunto de acciones está orientado a la preparación y calificación de las capas temáticas en función de la probabilidad de recarga asociada las características físicas del medio que representan. El segundo paso responde a la obtención de los factores de ponderación que mejor expresen las relaciones de los criterios, el control que ejercen sobre el proceso de recarga de acuíferos dentro del área evaluada y la

combinación final de las capas temáticas para obtener un mapa de zonas potenciales de recarga.

9. Hoja de ruta metodológica propuesta

Como complemento, en esta sección se describe la hoja de ruta para aplicar la metodología de identificación de zonas potenciales de recarga. Esta ruta se compone de tres fases principales: 1) una fase previa o de preparación, 2) la aplicación de la metodología, y 3) el análisis de resultados para priorizar áreas de estudio detallado, como se ilustra en la [Figura 34](#) o se encuentra el origen de la referencia.

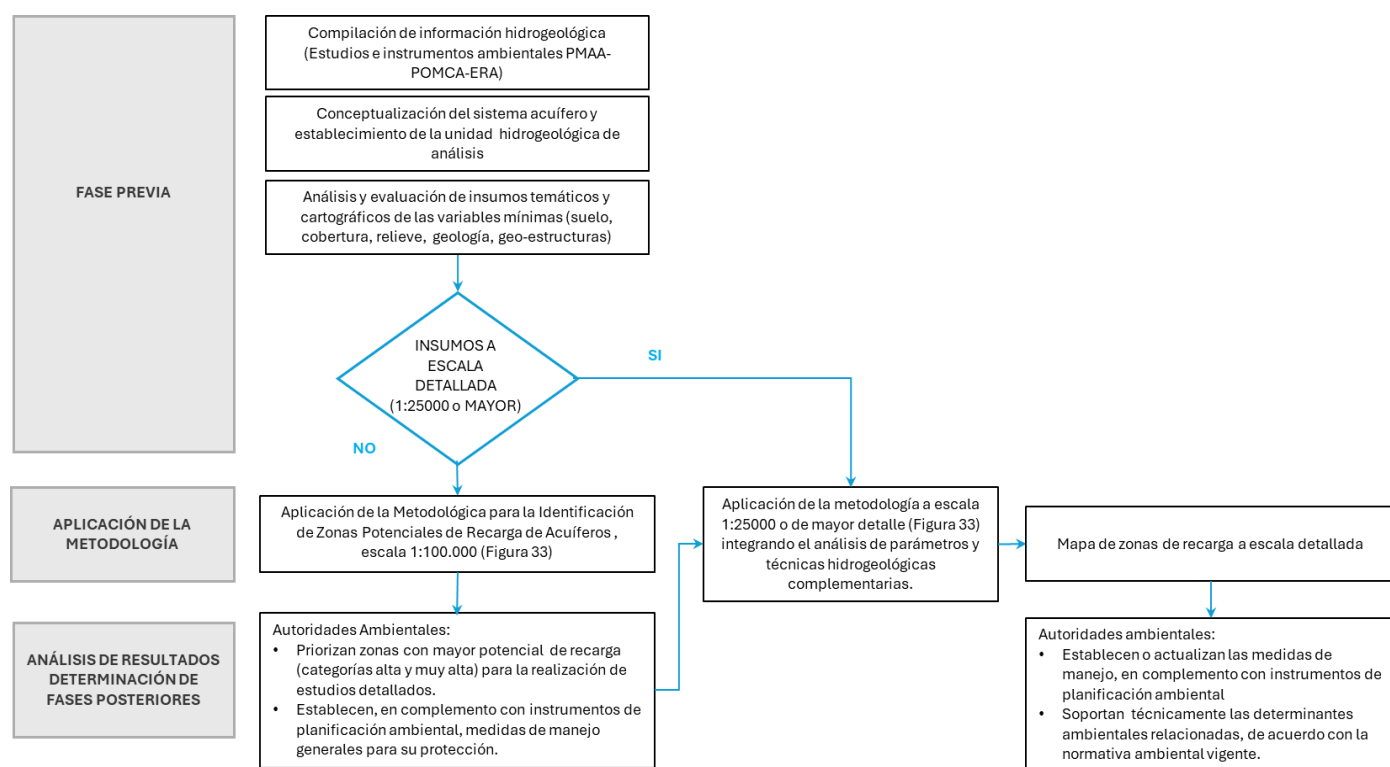


Figura 34. fases para la implementación de la metodología propuesta

9.1 Fase Previa

La fase previa corresponde al proceso de preparación y alistamiento requerido para la correcta aplicación de la metodología. En esta etapa, el usuario de la guía deberá verificar la disponibilidad y la calidad de la información hidrogeológica que le permita determinar la

unidad espacial de análisis, la escala de trabajo y el equipo técnico interdisciplinario que deberá conformarse para llevar a cabo el proceso.

Esta fase inicia con el análisis exhaustivo de la información hidrogeológica existente, con énfasis en la comprensión del modelo conceptual hidrogeológico, las tendencias del flujo subterráneo y la caracterización previa del sistema acuífero. Para ello se recomienda la compilación y evaluación de la información temática y cartográfica disponible no solo en la entidad, sino en diferentes instituciones del nivel nacional o en la academia. Dicha información debe contener, entre otros aspectos que se consideren relevantes, las variables contempladas en la propuesta metodológica, que incluyen la cobertura de la tierra, información de suelos, relieve, geología y geoestructuras. Es importante que la información cartográfica disponible que se pretenda emplear esté a la misma escala (1:100.000, 1:25.000 o mayores) y sistemas de referencia compatibles, con el propósito de evitar inconsistencia en el proceso de integración de la información y análisis espacial.

La revisión previa también debe considerar los instrumentos de planificación ambiental, tales como los Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos (PMAA) y los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA). Estos instrumentos pueden haber identificado previamente zonas potenciales de recarga. No obstante, tales delimitaciones pueden requerir actualización, verificación o estudios de detalle, para lo cual la presente metodología constituye una herramienta de apoyo técnico

9.1.1 Definición de la escala de trabajo de la guía

La metodología propuesta presenta indicaciones para su implementación a la escala en la que estén disponibles los insumos requeridos. La aplicación a escala regional (1:100.000), facilitará la identificación y priorización de las áreas con mayor potencial de recarga de acuíferos. A partir de esta identificación inicial, las autoridades ambientales podrán avanzar en el establecimiento de medidas de manejo ambiental de carácter general y posteriormente en la aplicación de la metodología a escalas más detalladas (1:25.000 o mayores). Esto permitirá obtener una zonificación más precisa de estas áreas en complemento con otras herramientas y técnicas hidrogeológicas.

9.1.2 Determinación del grupo de trabajo requerido

La aplicación de la metodología requiere la conformación de un equipo de trabajo que cuente con experiencia en diferentes disciplinas. En caso en que los usuarios de la guía, en especial las Autoridades Ambientales no cuenten con los profesionales y técnicos con el conocimiento, la experiencia y la disponibilidad de tiempo para el desarrollo de la metodología, se deberán definir los requerimientos para la contratación de dichos profesionales y técnicos.

A continuación, se presentan los perfiles profesionales sugeridos para la implementación de la metodología, los cuales pueden ser modificados de acuerdo con los requerimientos de trabajos complementarios, los aspectos técnicos y logísticos particulares de cada área de estudio:

Tabla 24. Perfil de los profesionales sugeridos para el desarrollo de la guía

PERFIL PROFESIONAL
Profesional en geociencias o ingeniería experto en hidrogeología.
Profesional en geociencias experto en geoestructural
Profesionales en el área de ingeniería o ciencias naturales con experiencia en la evaluación del componente suelo.
Profesional en sistemas de información geográfica (SIG).
Profesional en ciencias naturales o ingeniería con conocimiento y experiencia en evaluación hidroquímica e isotópica.

9.2 Aplicación de la metodología

La metodología está diseñada para ser aplicada mediante la integración y análisis de información temática y cartográfica a través de un proceso de algebra de mapas en sistemas de información geográfica – SIG. Para ello, se seguirán los pasos contemplados en la presente guía metodológica los cuales se resumen en la figura 33. Estos pasos incluyen el análisis de

cada una de las variables contempladas, la preparación de capas temáticas, su calificación de acuerdo con su importancia relativa en el proceso de recarga, la asignación de pesos ponderados con base en la combinación del método subjetivo o de conocimiento experto (Análisis jerárquico) y análisis estadístico (CRITIC), como se indica en los capítulos previos.

Con la aplicación de la metodología se podrá obtener un mapa de zonas potenciales de recarga a la escala en la cual se encuentren los insumos requeridos, con categorías que van desde muy bajo a muy alto potencial de recarga.

Por tanto conforme a lo establecido en las normas pertinentes, otros actores públicos y privados podrán hacer uso de la metodología propuesta.

9.3 Análisis de resultados

Con el análisis de resultados obtenidos se podrán priorizar zonas con mayor potencial de recarga a escala regional, en las cuales, las autoridades ambientales competentes pueden establecer medidas de manejo generales para su protección, y además orientar futuras investigaciones hidrogeológicas que incluyan el trabajo de campo requerido para aplicar esta metodología a escalas detalladas.

Considerando que la guía metodológica para la identificación de zonas potenciales de recarga es complementaria a instrumentos de planificación ambiental tales como los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas – POMCA y los Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos- PMAA, la aplicación de la metodología contribuye a fortalecer dichos instrumentos, proporcionando insumos técnicos para que las autoridades ambientales avancen en:

- ✓ Identificar a escala regional o actualizar a escala detallada las zonas de recarga,
- ✓ Orientar la realización de estudios hidrogeológicos avanzados, en complemento con métodos isotópicos y geoquímicos, hidrodinámicos, de modelación numérica, entre otros, tal como se plantea en los instrumentos de planificación ambiental antes mencionados.

- ✓ Formular o ajustar las medidas de manejo para su protección, la de los ecosistemas conexos y de los servicios ecosistémicos que ofrecen las aguas subterráneas, incluyendo el de aprovisionamiento.
- ✓ Sustentar las determinantes ambientales en el marco del artículo 10 de la Ley 388 de 1997 (modificado por la Ley 2294 de 2023),

En el Anexo 2 se presentan como ejemplo, los métodos isotópicos y geoquímicos que pueden ser empleados para profundizar en la caracterización de las zonas de recarga, los cuales podrán ser complementados con herramientas de modelación u otras técnicas avanzadas según criterio profesional. Su aplicación permitirá precisar y ajustar las medidas de manejo ambiental, fortaleciendo la gestión del recurso hídrico subterráneo

10. Referencias

Referencias bibliográficas

Balek, J. (1998). *Groundwater Recharge Concepts*. Prague, Czechoslovakia.

Béjar Pulido, Silvia Janeth, Cantú Silva, Israel, Domínguez Gómez, Tilo Gustavo, González Rodríguez, Humberto, Marmolejo Monciváis, José Guadalupe, Yáñez Díaz, María Inés, & Luna Robles, Erik Orlando. (2018). Redistribución de la precipitación y aporte de nutrimentos en *Pinus cooperi* C.E. Blanco. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(50), 94-120. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.237>

Benites, J., & Castellanos, A. (09 de 2003). Mejorando la humedad del suelo con agricultura de conservación. (T. y. Asociación Ecología, Ed.) *LEISA- Revista de Agroecología*, 19(2), 5-6. Obtenido de <http://www.leisa-al.org/web/images/stories/revistapdf/vol19n2.pdf>

Blanquer, Juan & Ibáñez, Sara & Moreno-Ramón, Héctor. (2010). La textura del suelo.

Cerrón J, del Castillo J, Bonnesoeur V, Peralvo M, Mathez-Stiefel S L. 2019. Relación entre árboles, cobertura y uso de la tierra y servicios hidrológicos en los Andes Tropicales: Una síntesis del conocimiento. Occasional Paper No. 27. Lima, Perú. Centro Internacional de Investigación Agroforestal (ICRAF), Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (CONDESAN). DOI: <http://dx.doi.org/10.5716/OP19056.PDF>

Derpsch, R. (12 de 06 de 2006). *Entender el Proceso de la Erosión y de la Infiltración de Agua en el Suelo*. Siembra Directa, Agricultura Sostenible en el Nuevo Milenio. Recuperado el 25 de 10 de 2020, de http://www.produccion-animal.com.ar/suelos_ganaderos/53-infiltracion.pdf

Faustino, J. (2006). Curso de Postgrado “Identificación, evaluación y manejo de zonas de recarga hídrica” [Notas de clase]. San Salvador, SV, CATIE.113 p, citado por Matus, Oscar, Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica: aplicación práctica en la subcuenca del Río Jucuapa, Nicaragua / Oscar Matus, Jorge Faustino y Francisco Jiménez. 1 ed.-Turrialba, C.R : Asdi ; CATIE, 2009. 40 p.: il. - (Serie técnica. Boletín técnico / CATIE; No.38).

Foster, S., Tuinhof, A., Kemper, K., Garduño, H., & Nanni, M. (2006). Caracterización de Sistemas de Agua Subterránea: conceptos clave e ideas erróneas frecuentes. *Gestión sustentable del agua subterránea. Conceptos y herramientas*. (G.-M. G. Team, Ed.) Washington D.C, Estados Unidos. Obtenido de <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/06/Gesti%C3%B3n-Sustentable-del-Agua-Subterr%C3%A1nea.-Conceptos-y-Herramientas.pdf>

Freeze, A., & Cherry, J. (1979). *Groundwater*. Estados Unidos: Prentice-Hall.

Gonzaga, L. (2002). *Memorias: Hidrología Forestal*. (U. N. Colombia, Ed.) Medellín.

IGAC. (2014) Instructivo manual de códigos

INAB (Instituto Nacional de Bosques). (2003). Metodología para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural. Manual Técnico. Guatemala.106 p.

IDEAM (2010). Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D. C., 72p.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2015). Estudio Nacional del Agua 2018. Bogotá: IDEAM.

Castellanos, H., Gómez, W. F. y Mayorga, N. (2021) Mapa nacional de coberturas de la tierra, escala 1:100.000, periodo 2018. Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia. Memoria técnica y resultados. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam).Bogotá, D. C., Colombia

Ideam. (2024). *Sistema de Monitoreo de las Coberturas de la Tierra - SIMCOT*. Obtenido de <https://storymaps.arcgis.com/stories/6b45024fb7a247219c33adc524345589>

Jaramillo, D. F. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. Facultad de Ciencias, Medellín. 619 p. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/147701>

Matus, J., F. J., & Jiménez, F. (2009). *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica. Aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa en Nicaragua*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza División de Investigación y Desarrollo Turrialba, Costa Rica.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2005). *Definición de Usos Alternativos y Sostenibles para la Ocupación de las Tierras a Nivel Nacional*. Bogotá.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2008). El papel de la repoblación forestal en la recarga de acuíferos . *Inventario de Tecnologías de Lucha Contra la Desertificación*. Madrid, España.

Morales Behar, A. M. (2011). *Propuesta de identificación de sitios para la infiltración de agua al acuífero de Querétaro*. Universidad Nacional Autónoma de México. México: Facultad de ingeniería.

Murillo Díaz, J. M., Orden Gómez, J. A., Armayor Cachero, J. L., & Castaño Castaño, S. (2000). *Recarga artificial de acuíferos. Síntesis metodológica. Estudios y actuaciones realizadas en la Provincia de Alicante*. Alicante.

Ramos, L., Moreno, M. F., Roldán, J., & Cienfuegos, I. (s.f.). *Influencia de la vegetación en el balance hídrico superficial de la cuenca hidrológica de “El Cabril”*. ENRESA; Universidad de Córdoba, Córdoba, España.

- Samper, J., Huguet, L., Ares, J., & García-Vera, M. A. (1999). Modelos interactivos de balance hidrológico. En A. R. Eds. R. Muñoz-Carpena, *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo* (págs. 187-193). Tenerife.
- Schosinsky, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*, 13-30.
- Simmers, I. (1997). *Recharge of phreatic Aquifer in (Semi-) Arid Areas*. Rotterdam, Netherlands: A.A Balkema.
- UCM. (2018). *Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Educación - Dpto. Didáctica de las Ciencias Experimentales*. Obtenido de https://webs.ucm.es/info/diciex/proyectos/agua/escorrentia_subterranea.html
- USDA. (1999). *Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo*. Departamento de Agricultura de los EEUU, Washington D.C.
- Vélez, M. y Vásquez, L. (2004). Métodos para determinar la recarga en acuíferos. Avances en recursos hidráulicos. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/6105/>
- Zinck, J. A. (2012). Geopedología. Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales. ITC Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation. Enschede, The Netherlands.

Referencias Metodológicas

- Aishlin, P. S. (2006). Groundwater recharge estimation using chloride mass balance, dry creek experimental watershed (dissertation).<http://scholarworks.boisestate.edu/td/622/>
- Andres, A. S. (1991). Open file report No.34, methodology for mapping ground-water recharge areas in delaware's coastal plain. Newark, Delaware: Delaware Geological Survey Retrieved from <http://udspace.udel.edu/bitstream/handle/19716/3221/OFR34.pdf?sequence=1>.

- Antioquia, G. G. U. d. (2011). Determinación y Protección de las Potenciales Zonas de Recarga en el Norte del Valle de Aburrá. (pp. 295). Medellín, Colombia: Área Metropolitana Valle de Aburrá.
- Authority, L. S. R. C. (2014). Guidance for the protection and restoration of significant groundwater recharge areas (SGRAs) in the Lake Simcoe watershed. Retrieved from Toronto, Ontario, Canada:
- Bueso Campos, M., Mardoqueo Rodas, A., & García Álvarez, M. G. (2010). Identificación y caracterización de las zonas con mayor potencial de recarga hídrica en las subcuencas de los ríos Tacó y Shusho, Municipio de Chiquimula. Retrieved from Guatemala:
- Chachadi, A. G. (s.f.). New indicator based method SALDIT for delineation of natural groundwater recharge areas. International Conference on Water Resources, Coastal and Ocean Engineering (ICWRCOE'15), 4, 649-659.
- Corporación Geoambiental Terrae (Terrae) (2021) Propuesta de delimitación del Cerro Seco como área protegida del orden distrital. Evaluación de los componentes geológico, hidrológico hidrogeológico y ecosistémico. Recuperado de: <https://www.terraegeoambiental.org/wp-content/uploads/2023/12/PROPUESTA-DE-DELIMITACION-DE-CERRO-SECO-COMO-AREA.pdf>
- G. Charles, E., Behroozi, C., Schooley, J., & Hoffman, J. L. (1993). A method for evaluating groundwater-recharge areas in New Jersey. Trenton, New Jersey: New Jersey Geological Survey.
- Goody, N., Church, R., Quinn, S., & Salmon, R. (2003). Derivation of a methodology for groundwater recharge assessment in Scotland and Northern Ireland. In S. E. P. Agency (Ed.), (pp. 81). Scotland: Entec UK Limited.
- Guzmán Monge, A., & Díaz Hernández, A. (2007). Identificación de las áreas de recarga acuífera y zonas de protección de los manantiales de canton central de Cartago. Paper presented at the IX Congreso Nacional de Ciencias Exploraciones fuera y dentro del aula Cartago, Costa Rica

Herrera Ibáñez, Isaac Rodolfo, & Brown Manrique, Oscar. (2011). Propuesta de una metodología para la estimación de áreas de recarga hídrica en Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(4), 48-52. Recuperado en 22 de diciembre de 2022, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542011000400009&lng=es&tlng=es.

Hsin-Fu, Y., Youg-Sin, C., Hung-I, L., & Cheng-Haw, L. (2016). Mapping groundwater recharge potential zone using a GIS approach in Hualian River, Taiwan. *Sustainable Environment Research*, 26(1), 33-43. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.serj.2015.09.005>

López-Geta, J. A., Andreo, B., Vías, J., Durán, J. J., Carrasco, F., & Jiménez, P. (2004). Aproximación metodológica para evaluar la recarga en acuíferos carbonáticos, 4. Retrieved from

Marchildon, M., Thompson, P. J., Cuddy, S., Wexler, E. J., Howson, K., & Kassenaar, J. D. C. (2015). A methodology for identifying ecologically significant groundwater recharge areas. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, 1-13. doi:10.1080/07011784.2015.1080125

Marks, R. J., Lawrence, A. R., Humpage, A. J., & Hargreaves, R. (2004). Recharge through Till: Developing a methodology for estimating groundwater recharge with examples from two case studies in East Anglia In B. G. S. I. Report (Ed.), (Vol. IR/04/122, pp. 42).

Matus, O., Faustino, J., & Jiménez, F. (2009). Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica. *Serie Técnica. Boletín técnico*. Retrieved from

Mondal, N. C., Singh, V. P., & Sankaran, S. (2011). Demarcation of prospective groundwater recharge zones in hard rock area from Southern India. *Scientific Research and Essays*, 6, 3539-3552. Retrieved from www.academicjournals.org/journal/SRE/article-abstract/5FCF36531292 doi:10.5897/SRE11.659

Mondal, N. C., & Singh, V. S. (s.f.). A new approach to delineate the groundwater recharge zone in hard rock terrain. *CURRENT SCIENCE*, 87(5), 658-662.

Mondal, N. C., & Singh, V. S. (2004). Analysis of unconfined aquifer response to delineate potential groundwater recharge zone in hard rock terrain. Paper presented at the 2nd Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources Conference, Suntec, Singapore.
https://www.researchgate.net/publication/216087091_Impact_of_Pollution_due_to_Tanneries_on_Groundwater_Regime

Peñuela, L. A., & Carrillo, J. J. (2012). Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: –sur de la Mesa Central, México. *Geografía física*, 81. Retrieved from.

Ranjana V.K. y Sindhu G. (2014) Delineation of Recharge Zones in Vamanapuram River Basin. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 5, Issue 7. ISSN 2229-5518

Ramírez Granados, P. (2013). Determinación de la recarga acuífera potencial mediante un sistema de información geográfica para la cuenca del Río Frío, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 2, 15–35. Retrieved from <http://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/5987>

Senanayake, I. P., Dissanayake, D. M. D. O. K., Mayadunna, B. B., & Weerasekera, W. L. (s.f.). An approach to delineate groundwater recharge potential sites in Ambalantota, Sri Lanka using GIS techniques. *GEOSCIENCE FRONTIERS*, 7(1), 115-124.

Tapia Morales, N. (2011). Aplicación de metodologías para la estimación espacial de recarga y conductividad hidráulica. Caso de los Andes centrales de Perú. (Máster), Universidad de Málaga.

Vélez O., M. V., & Rhenals G., R. L. (2008). Determinación de la recarga con isótopos ambientales en los acuíferos de Santa fe de Antioquia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 18. Retrieved from

Vieira Vasconcelos, V., Pereira Martins Junior, P., & Moreira Hadad, R. (2013). Methodology for rapid assessment of aquifer recharge areas. *Geologia USP. Série Científica*, 13, 6-6. Retrieved from

www.revistas.usp.br/guspsc/article/download/61736/64607 doi:10.5327/Z1519-874X2013000200005

Wexler, E. J., & Kassenaar, D. (2013). Ecologically significant groundwater recharge area assessment for the Oro North, Oro South, and Hawkestone Creeks subwatersheds. Toronto, Ontario, Canada: Earthfx Retrieved from http://www.lsrca.on.ca/Shared%20Documents/reports/esgra_orocreeks.pdf.

Yáñez-Díaz, María Inés, Cantú-Silva, Israel, González-Rodríguez, Humberto, & Uvalle-Sauceda, José I. (2014). Redistribución de la precipitación en tres especies arbustivas nativas y una plantación de eucalipto del noreste de México. *Tecnología y ciencias del agua*, 5(2), 71-84. Recuperado en 28 de octubre de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222014000200005&lng=es&tlng=es.

Zhu, BQ., Wang, YL. Statistical study to identify the key factors governing ground water recharge in the watersheds of the arid Central Asia. *Environ Monit Assess* 188, 66 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10661-015-5075-4>

Referencias Incidencia Estructural

Adewumi, A. J. P., y Anifowose, Y. B. (2017). Hydrogeologic characterization of Owo and its environs using remote sensing and GIS. *Applied Water Science*, 7(6), 2987–3000. <https://doi.org/10.1007/s13201-017-0611-8>

Arcila, M. y Muñoz- Martín, A. (2020). Integrated perspective of the present-day stress and strain regime in Colombia from analysis of earthquake focal mechanisms and geodetic data. In: Gómez, J. y Pinilla- Pachon, A.O. (editors), *The Geology of Colombia*, Volume 4. Quaternary. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 38, p. 549- 569. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.17>.

- Arulbalaji, P., Padmalal, D., y Sreelash, K. (2019). GIS and AHP Techniques Based Delineation of Groundwater Potential Zones: a case study from Southern Western Ghats, India. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38567-x>
- Aslan, V., y Çelik, R. (2021). Integrated gis-based multi-criteria analysis for groundwater potential mapping in the euphrates's sub-basin, harran basin, turkey. *Sustainability (Switzerland)*, 13(13). <https://doi.org/10.3390/su13137375>
- Avand, M., Janizadeh, S., Tien Bui, D., Pham, V. H., Ngo, P. T. T., y Nhu, V. H. (2020). A tree-based intelligence ensemble approach for spatial prediction of potential groundwater. *International Journal of Digital Earth*, 13(12), 1408–1429. <https://doi.org/10.1080/17538947.2020.1718785>
- Berg, S. S., & Skar, T. (2005). Controls on damage zone asymmetry of a normal fault zone: outcrop analyses of a segment of the Moab fault, SE Utah. *Journal of Structural Geology*, 27(10), 1803-1822.
- Caine, J. S., Evans, J. P., y Forster, C. B. (1996). Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24(11), 1025–1028. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)024<1025:FZAAPS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024<1025:FZAAPS>2.3.CO;2)
- Carvajal, J. H. (2012). *Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia*. Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/9789589952825>
- Choi, J. H., Edwards, P., Ko, K., y Kim, Y. S. (2016). Definition and classification of fault damage zones: A review and a new methodological approach. En *Earth-Science Reviews* (Vol. 152, pp. 70–87). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.11.006>
- Curzi, M., Giuntoli, F., Vignaroli, G., y Viola, G. (2023). Constraints on upper crustal fluid circulation and seismogenesis from in-situ outcrop quantification of complex fault zone permeability. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-32749-4>

- Danso, S. Y., y Ma, Y. (2023). Geospatial techniques for groundwater potential zones delineation in a coastal municipality, Ghana. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 26(1), 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2022.12.004>
- Escuder Viruete, J. y Lorenzo Álvarez, S. 2002. Simulación geoestadística en 2-D de las zonas de falla en el plutón granodiorítico de Fontanosas (Ciudad Real), zona Centro-Ibérica meridional. *Boletín Geológico y Minero*, 113 (4): 351-367 ISSN: 0366-0176
- Faulkner, D. R., y Armitage, P. J. (2013). The effect of tectonic environment on permeability development around faults and in the brittle crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 375, 71–77. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.05.006>
- Fernandes, A., Rouleau, A., y do Amaral Vargas Junior, E. (2023). *Structural Geology Applied to Fractured Aquifer Characterization*.
- Flores Garnica, J. G., y Flores-Rodríguez, A. G. (2020). Análisis comparativo del número e intervalos de clases de riesgo de incendios forestales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(62). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i62.775>
- Forero-Ortega, A. J., López-Isaza, J. A., López Herrera, N. R., Cuéllar-Cárdenas, M. A., Cetina Tarazona, L. M., & Aguirre Hoyos, L. M. (2021). Geological structural mapping and geocronology of shear zones: A methodological proposal. *Boletín Geológico*, 48(1), 81-122. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.Geol.48.1.2021.524>
- Fossen, H. (2016). *Structural Geology*. Cambridge University Press.
- Fossen, H. (2020). Fault classification, fault growth and displacement. En *Regional Geology and Tectonics: Volume 1: Principles of Geologic Analysis* (pp. 119–147). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64134-2.00007-9>
- Gómez-Hurtado, E., Aguirre-Hoyos, L. M., Diederix, H., Audemard, F. A., Mora-Páez, H., Bohórquez-Orozco, O. P., ... & Plazas-Ruiz, J. M. (2022). Neotectónica y paleosismología de la Falla de Algeciras, Huila, Colombia. <https://doi.org/10.32685/9789585399389>

- Khodaei, K., y Nassery, H. R. (2013). Groundwater exploration using remote sensing and geographic information systems in a semi-arid area (Southwest of Urmieh, Northwest of Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 6(4), 1229–1240. <https://doi.org/10.1007/s12517-011-0414-4>
- Kim, Y. S., y Sanderson, D. J. (2005). The relationship between displacement and length of faults: A review. *Earth-Science Reviews*, 68(3–4), 317–334. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.06.003>
- Kim, Y.-S., Peacock, D., y Sanderson, D. (2004). Fault damage zones. *Journal of Structural Geology*, 26(3), 503–517. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2003.08.002>
- López Isaza, J. A., Cuéllar Cárdenas, M. A., Cetina Tarazona, L. M., Forero Ortega, A. J., Suárez Arias, A. M. Muñoz Rodríguez, O. F., Muñoz Rodríguez, O. F., Aguirre Hoyos, L. M., & Gutiérrez López, M. J. (2021). Graphical representation of structural data in the field: A methodological proposal for its application in deformed areas. *Boletín Geológico*, 48(1), 123-139. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.48.1.2021.504>
- Lugo Hubp, J. I. (1988). *Elementos de geomorfología aplicada (métodos cartográficos)* (Dirección General de Publicaciones, Ed.; Primera). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Makonyo, M., y Msabi, M. M. (2021). Identification of groundwater potential recharge zones using GIS-based multi-criteria decision analysis: A case study of semi-arid midlands Manyara fractured aquifer, North-Eastern Tanzania. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100544>
- Manzocchi, T. (2002). The connectivity of two-dimensional networks of spatially correlated fractures. *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 38, NO. 9, 1162, doi:10.1029/2000WR000180, 2002.
- Maqsoom, A., Aslam, B., Khalid, N., Ullah, F., Anysz, H., Almaliki, A. H., Almaliki, A. A., y Hussein, E. E. (2022). Delineating Groundwater Recharge Potential through Remote

- Sensing and Geographical Information Systems. *Water (Switzerland)*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/w14111824>
- Mattivi, P., Franci, F., Lambertini, A., y Bitelli, G. (2019). TWI computation: a comparison of different open source GISs. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s40965-019-0066-y>
- Matus, O., Faustino, J., y Jiménez, F. (2009). *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica Aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua*.
- Meijerink, A.M.J (2007). Remote sensing applications to groundwater. Printed by UNESCO. UNESCO 2007.
- Moreno Andrade, Y. Y. (2022). *Aplicación de la técnica, que utiliza el flujo de acumulación, para determinar sitios en los que se puedan presentar nuevos deslizamientos, en taludes adyacentes a la Transversal Central del Pacífico (Sector Tadó – La Virginia)*. Universidad Nacional de Colombia.
- Nyberg, B., Nixon, C. W., y Sanderson, D. J. (2018). NetworkGT: A GIS tool for geometric and topological analysis of two-dimensional fracture networks. *Geosphere*, 14(4), 1618–1634. <https://doi.org/10.1130/GES01595.1>
- Roa Lobo, J., & Kamp, U. (2012). Uso del índice topográfico de humedad (ITH) para el diagnóstico de la amenaza por desborde fluvial, estado Trujillo-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 53(1), 109–126.
- Ortega, O. J., Marrett, R. A., & Laubach, S. E. (2006). A scale-independent approach to fracture intensity and average spacing measurement. *AAPG bulletin*, 90(2), 193-208.
- Sanderson, D.J, y Nixon, C.W. (2015). The use of topology in fracture network characterization. *Journal of Structural Geology* 72 (2015) 55-66.
- Senapati, U., y Das, T. K. (2022). GIS-based comparative assessment of groundwater potential zone using MIF and AHP techniques in Cooch Behar district, West Bengal. *Applied Water Science*, 12(3). <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01509-y>.

- Scibek, J. (2020). Multidisciplinary database of permeability of fault zones and surrounding protolith rocks at world-wide sites. *Sci Data* 7, 95 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0435-5>
- Singhal, B., y Gupta, R. (2010). *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks, Second Edition*.
- Suárez-Arias, A. M., López-Isaza, J. A., Forero-Ortega, A. J., Cuéllar-Cárdenas, M. A., Quiroz-Prada, C. A., Cetina Tarazona, L. M., Muñoz-Rodríguez, O. F., Aguirre Hoyos, L. M., & López Herrera, N. R. (2021). Relevant aspects to the recognition of extensional environments in the field. *Boletín Geológico*, 48(2). <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.48.2.2021.543>.
- Velandia, F. (2017). Cinemática de las fallas mayores del Macizo de Santander-énfasis en el modelo estructural y temporalidad al sur de la Falla de Bucaramanga (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia (UNAL)).
- Walsh, J. J., & Watterson, J. (1993). Fractal analysis of fracture patterns using the standard box-counting technique: valid and invalid methodologies. *Journal of structural Geology*, 15(12), 1509-1512.
- Waters, P., Greenbaum, D., Smart, P. L., y Osmaston, H. (1990). Applications of remote sensing to groundwater hydrology. *Remote Sensing Reviews*, 4(2), 223–264. <https://doi.org/10.1080/02757259009532107>
- Watkins, H., Bond, C. E., Healy, D., & Butler, R. W. (2015). Appraisal of fracture sampling methods and a new workflow to characterise heterogeneous fracture networks at outcrop. *Journal of Structural Geology*, 72, 67-82.

Referencias Litología

- Acworth, I. (2019). Investigating Groundwater. London: CRC Press.
- Bear, J. (2007). Hydraulics of groundwater. Haifa, Israel: Dover Publications, Inc.
- Campbell, C. V. (1967). Lamina, lamiset, bed and bedset. *Sedimentology*, 8:7-26.

- Dunham, R. I. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional texture. En: Ham, W.E. (ed.). Classification of carbonate rocks. Memoir I of American Association of Petroleum Geologist, 108-121. Tulsa, Oklahoma.
- Folk, R.L. (1974) Petrology of Sedimentary Rocks. Hemphill Publishing Co., Austin, 170 p.
- Freeze, E., & Cherry, J. (1979). Groundwater. Prentice Hall.
- Hamblin, W. K. (1992): Earth's dynamic systems. - 647 p., Macmillan Publishing Company, Ontario.
- INGEOMINAS. (2003). Toma de datos en la libreta de campo. Bogotá.
- INGEOMINAS. (2010). Memoria técnica plancha 5-17. Mapa de permeabilidades de Colombia a escala 1:500.000. Bogotá.
- Kidwell, S. N. (1991). The stratigraphhy of shell concentrations. En: Allison, P. A. & Briggs, D. E. Taphonomy: Relasing the data locked in the fossil record. Plenum Press, 211-290. New York.
- Kresic, N. (2023). Hydrogeology 101. Introduction to Groundwater Science and Engineering. Warrenton: Blue Ridge Press.
- Krumbein, W. C., y Sloss, L. L. (1969). Estratigrafía y sedimentación. Union tipografica editorial hispano-americana.
<https://books.google.com.ec/books?id=U3IOGQAACAAJ>
- Morris, D. A., & Johnson, A. I. (1967). Summary of hydrologic and physical properties of rock and soil materials, as analyzed by the hydrologic laboratory of the US Geological Survey, 1948-60 (No. 1839-D). US Government Printing Office.
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E. and Siever, R. (1973) Sand and Sandstones. Springer Verlag, New York. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4615-9974-6>
- Pettijohn F, Potter P y Siever R. (1987). Sand and sandstone, Springer – Verlag, New York, Segunda edición.
- Powers, M. C. (1953). “A new roundness scale for sedimentary particles.” *J. Sediment. Petrol.*, 23~2!, 117–119.
- Reineck, H. E., & Singh, I. B. (1973). Depositional Sedimentary Environments (439 p.). Springer-Verlag.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-96291-2>

- Schmid, R. (1981). Descriptive nomenclature and classification and classification of pyroclastic deposits and fragments: recommendations of the IUGS Subcommittee on the systematics of igneous rocks. *Geology* 9: 41-43.
- Singhal, B., & Gupta, R. (2010). *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. 2nd Edition. London: Springer.
- Streckeisen, A. (1976): To each plutonic Rock its proper name.- *Earth Science Rev.* Bd. 12 p.1-33 Amsterdam, London, New York
- Úbeda, J., & Delgado, Y. (2018). La infiltración del agua en los suelos y componentes artificiales y materia orgánica que se utilizan en ellos para la agricultura. León.
- Wentworth, C.K. (1922) A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. *Journal of Geology*, 30, 377-392.<https://doi.org/10.1086/622910>

Referencias Relieve

- Adewumi, A. J. P., y Anifowose, Y. B. (2017). Hydrogeologic characterization of Owo and its environs using remote sensing and GIS. *Applied Water Science*, 7(6), 2987–3000. <https://doi.org/10.1007/s13201-017-0611-8>
- Arulbalaji, P., Padmalal, D., y Sreelash, K. (2019). GIS and AHP Techniques Based Delineation of Groundwater Potential Zones: a case study from Southern Western Ghats, India. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38567-x>
- Avand, M., Janizadeh, S., Tien Bui, D., Pham, V. H., Ngo, P. T. T., y Nhu, V. H. (2020). A tree-based intelligence ensemble approach for spatial prediction of potential groundwater. *International Journal of Digital Earth*, 13(12), 1408–1429. <https://doi.org/10.1080/17538947.2020.1718785>
- Carvajal, J. H. (2012). *Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia*. Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/9789589952825>
- Danso, S. Y., y Ma, Y. (2023). Geospatial techniques for groundwater potential zones delineation in a coastal municipality, Ghana. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 26(1), 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2022.12.004>

- Esri. (s/f). *Como funciona la densidad de línea*. Recuperado el 11 de diciembre de 2024. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-line-density-works.htm>
- IDEAM. (2013). Zonificación y Codificación de Cuencas Hidrográficas. *Documento IDEAM*, 46. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022655/MEMORIASMAPAZONIFICACIONHIDROGRAFICA.pdf>
- José, R. L., y Ulrich, K. (2012). Use of the topographic wetness index (TWI) for the diagnosis of the river overflow threat, Trujillo State-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 53(1), 109–126.
- Khodaei, K., y Nassery, H. R. (2013). Groundwater exploration using remote sensing and geographic information systems in a semi-arid area (Southwest of Urmieh, Northwest of Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 6(4), 1229–1240. <https://doi.org/10.1007/s12517-011-0414-4>
- Lugo Hubp, J. I. (1988). *Elementos de geomorfología aplicada (métodos cartográficos)* (Dirección General de Publicaciones (ed.); Primera). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Makonyo, M., y Msabi, M. M. (2021). Identification of groundwater potential recharge zones using GIS-based multi-criteria decision analysis: A case study of semi-arid midlands Manyara fractured aquifer, North-Eastern Tanzania. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100544>
- Maqsoom, A., Aslam, B., Khalid, N., Ullah, F., Anysz, H., Almaliki, A. H., Almaliki, A. A., y Hussein, E. E. (2022). Delineating Groundwater Recharge Potential through Remote Sensing and Geographical Information Systems. *Water (Switzerland)*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/w14111824>
- Marthews, T. R., Dadson, S. J., Lehner, B., Abele, S., y Gedney, N. (2015). High-resolution global topographic index values for use in large-scale hydrological modelling.

Hydrology and Earth System Sciences, 19(1), 91–104. <https://doi.org/10.5194/hess-19-91-2015>

Mattivi, P., Franci, F., Lambertini, A., y Bitelli, G. (2019). TWI computation: a comparison of different open source GISs. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s40965-019-0066-y>

Matus, O., Faustino, J., y Jiménez, F. (2009). *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica Aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua*.

Moreno Andrade, Y. Y. (2022). *Aplicación de la técnica, que utiliza el flujo de acumulación, para determinar sitios en los que se puedan presentar nuevos deslizamientos, en taludes adyacentes a la Transversal Central del Pacífico (Sector Tadó – La Virginia)*. Universidad Nacional de Colombia.

Senapati, U., y Das, T. K. (2022). GIS-based comparative assessment of groundwater potential zone using MIF and AHP techniques in Cooch Behar district, West Bengal. *Applied Water Science*, 12(3). <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01509-y>

Singhal, B., y Gupta, R. (2010). *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks, Second Edition*.

Referencias SIG – análisis multicriterio

Achieng, K. O., & Zhu, J. (2021). *Estimation of groundwater recharge using multiple climate models in Bayesian frameworks*. *Journal of Water and Climate Change*, 12(8), 3865-3885.

Cañas, H., Herrera, W., Ruiz, D., Manotas, D., Galvis, M., Viana, F., Ocampo, E., Becerra, J., Sotelo, A. y Porras, A. (2022). *Generación de conocimiento hidrogeológico que permita establecer la ocurrencia, origen y conexión entre los flujos de agua subterránea de la cuenca alta de las quebradas La Baja y Angosturas con el Páramo de Santurbán mediante técnicas hidrogeoquímicas e isotópicas*. Bogotá D.C.: Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/10.14.2022.1028>

- Costa, A. P. D. A., Choren, R., Pereira, D. A. D. M., Terra, A. V., Costa, I. P. D. A., Junior, C. D. S. R., & Moreira, M. Â. L. (2024). Integrating multicriteria decision making and principal component analysis: a systematic literature review. *Cogent Engineering*, 11(1), 2374944.
- Dragan, P; Zeljko, S; Sinisa, S. (2018). A new model for determining weight coefficient of criteria in MCDM models: Full consistency method (FUCOM). *Symmetry* 10(9), 393
- Delgado, G., & Cano, M. B. II (2005): Evaluación multicriterio y Sistemas de Información Geográfica en la Ordenación del Territorio.
- Diakoulaki, D., Mavrotas, G., & Papayannakis, L. (1995). Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method. *Computers & Operations Research*, 22(7), 763-770.
- Goepel, K. D. (2018). Implementation of an online software tool for the analytic hierarchy process (AHP-OS). *International journal of the analytic hierarchy process*, 10(3).
- Healy, R. W. (2010). Estimating groundwater recharge. Cambridge University Press.
- Herrera Ibáñez, I. R., & Brown Manrique, O. (2011). Propuesta de una metodología para la estimación de áreas de recarga hídrica en Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(4), 48-52.
- Malczewski, J. (1999). GIS and multicriteria decision analysis. John Wiley & Sons, Inc.
- Odu, G. O. (2019). Weighting methods for multi-criteria decision making technique. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 23(8), 1449-1457.
- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical modelling*, 9(3-5), 161-176.
- Universidad del Valle (Univalle) y Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) Informe técnico de la actividad 2. En relación con el desarrollo de una propuesta metodológica para la priorización de zonas potenciales de recarga del sistema acuífero Valle del Cauca, SAM 3.1. Convenio Interadministrativo No. 253 de 2021. Cali, Valle del Cauca: Grupo Cinara.

Vélez, M. V., & Rhenals, R. L. (2008). Determinación de la recarga con isotopos ambientales en los acuíferos de Santa Fe de Antioquia. Boletín de Ciencias de la Tierra, (24), 37-53.