

Imagen tomada de Pixabay.com

# Capítulo 3

## **Identificación de zonas potenciales de recarga hidrogeológica mediante procesos de análisis jerárquico en el sistema acuífero La Mojana** **Identification of Potential Hydrogeological Recharge Areas Through Hierarchical Analysis Processes in La Mojana Aquifer System**

Herrera-Arango, J.<sup>1</sup>, Pérez-Peñate, A. K.<sup>1</sup>, Rosso-Pinto, M. J.<sup>1</sup>,  
Marrugo-Negrete, J. L.<sup>1</sup>, Paternina-Uribe, R.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Investigación en Agua, Química Aplicada y Ambiental, Departamento de Química, Facultad de Ciencias Básicas de la Universidad de Córdoba, Sede Montería, Córdoba, Colombia.

\* Autor de correspondencia: jairo.herrera@geologist.com

## Resumen

El conocimiento de los recursos hidrogeológicos en Colombia se considera muy bajo, pues solo algunos acuíferos cuentan con información mínima suficiente para una gestión adecuada. Esto pone en riesgo la seguridad hídrica de las poblaciones que se abastecen del recurso, como es el caso del Sistema Acuífero La Mojana (SALM), que surte la demanda hídrica de por lo menos doscientos mil habitantes solo en la jurisdicción de Corpomojana. Esta condición resalta la necesidad de investigar las variables y los factores que determinan los diferentes fenómenos que rigen el agua subterránea. El objetivo de este capítulo es determinar las zonas potenciales de recarga en el SALM, bajo condiciones de información escasa debido a la gran extensión del acuífero, el reducido número de registros de pozos y pruebas de bombeo y, especialmente, a la escala de la información cartográfica disponible. Se analiza la recarga potencial como la respuesta hidrogeológica a diferentes características regionales como la topografía, que influye sobre la hidrología y la distribución de los suelos; la litología, que controla la infiltración, los lineamientos estructurales que favorecen la permeabilidad secundaria y la geomorfología, que configura áreas que facilitan la percolación; así como el uso de descriptores hidrológicos como el Número de Curva e índices topográficos que contribuyen a esclarecer las respuestas hidrológicas del territorio. El método propuesto se fundamenta en el uso de sensores remotos y criterios de decisión espacializados, cuya evaluación y valoración se hace mediante un proceso de análisis jerárquico o AHP, por sus siglas en inglés. Los resultados obtenidos proporcionan una comprensión más completa de la distribución del agua subterránea en la subregión de La Mojana y ofrecen un mapa hidrogeológico prospectivo como soporte técnico para una gestión más eficiente; adicionalmente, sirven como herramientas para el análisis zonificado de la susceptibilidad a la contaminación del acuífero.

**Palabras clave:** análisis jerárquico, criterios de decisión, recarga potencial, recurso hidrogeológico, zonas potenciales de recarga.

## Introducción

El 12 % de la demanda hídrica en Colombia es abastecida mediante aguas subterráneas (1); sin embargo, el estado del conocimiento de los recursos hidrogeológicos se considera muy bajo, pues de los 61 sistemas acuíferos identificados en el país, solo diecinueve (30,8 %) cuentan con la información mínima suficiente para una gestión adecuada (2).

El caso del Sistema Acuífero La Mojana, definido por IDEAM (2015) (1), es de especial interés pues la comprensión del agua subterránea y las zonas de recarga permanecen en muy bajos niveles (3,4), aunque la demanda hídrica de los más de doscientos mil habitantes que, según DANE (5), habitan en el área de la jurisdicción de la Corporación de Desarrollo Sostenible para el San Jorge y La Mojana (Corpomojana) es abastecida con recursos hidrogeológicos.

El sistema acuífero La Mojana cuenta con una extensión de 12.672 km<sup>2</sup>, distribuidos en 32 municipios pertenecientes a los departamentos de Antioquia (0,3 %), Bolívar (13,3 %), Córdoba (26,4 %) y Sucre (60 %). Por su parte, la subregión de La Mojana, con una extensión de 9.097 km<sup>2</sup>, está compuesta por 22 municipios de los cuales siete integran la jurisdicción de Corpomojana.

Sobre las limitaciones en el conocimiento para la gestión de los acuíferos, IDEAM (2019) (2) resalta la necesidad de potenciar la investigación de las variables y los factores que determinan los diferentes fenómenos que rigen el recurso hidrogeológico; en particular, revela la importancia de determinar las zonas potenciales de recarga de los acuíferos regionales.

La recarga hidrogeológica es la fracción de agua superficial que alimenta el acuífero mediante su infiltración a través de la zona no saturada hacia el nivel freático. Por esta razón, no solo está en función de la precipitación sino también de múltiples características del territorio, que incluyen las geomorfológicas como la pendiente, los lineamientos estructurales, la rugosidad y la curvatura del terreno, entre otros; las propiedades

del suelo, incluidas las clases texturales y la profundidad, la cobertura vegetal y la capacidad de almacenamiento hídrico y, finalmente, las propiedades hidrodinámicas de las formaciones geológicas (6,7).

De esta forma, la recarga potencial es la respuesta hidrogeológica a diferentes características regionales como la topografía, que influye sobre la hidrología y la distribución de los suelos; a la litología, que controla la infiltración, los lineamientos estructurales que favorecen la permeabilidad secundaria y la geomorfología, que configura áreas que facilitan la percolación, entre otros.

A la información regionalizada mencionada, se suma el uso de descriptores hidrológicos como el Número de Curva del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos e índices topográficos como el índice topográfico de humedad de laderas, los cuales ayudan a esclarecer las respuestas hidrológicas del territorio y, de esta forma, a identificar las áreas que muestran mayor susceptibilidad a la recarga de las aguas subterráneas.

La investigación de las zonas potenciales de recarga de acuíferos regionales, basada en sensores remotos y datos espacializados, es un método rápido, preciso y de bajo costo que se está implementando en áreas con poca información, especialmente en Asia y África (8,9) y que cuenta con ejemplos en Colombia (10-12).

En la evaluación y la valoración de diversos insumos cartográficos se utiliza el análisis multicriterio que, a partir de juicios informados, ofrece alternativas de integración ponderada. Existen diferentes métodos de análisis multicriterio aplicados a la delimitación de las zonas potenciales de recarga, como la teoría de la utilidad de múltiples atributos (13), la teoría de conjuntos difusos (14,15), el factor de influencia múltiple (16,17), el análisis envolvente de datos (18), Electre (19), Topsis (20); (21) y Promethee (22); sin embargo, la técnica más utilizada para describir las zonas potenciales de recarga hidrogeológica es el proceso de análisis jerárquico o AHP, por sus siglas en inglés, debido a su capacidad de integración de datos regionalizados (9,23-28).

El proceso de análisis jerárquico es una teoría sobre valoraciones y juicios técnicos, que combina lo científico y lo racional con lo intangible para sintetizar la comprensión de un fenómeno. Este proceso permite llevar un fenómeno multidimensional o multicriterio a una escala de prioridades conocidas mediante el uso de sumas ponderadas (29).

Una de las mayores bondades de la delimitación de las zonas potenciales de recarga hidrogeológica a partir de la integración de datos regionalizados con procesos de análisis jerárquicos, es la comprensión de las características que controlan los acuíferos regionales, sus procesos dominantes, sus restricciones y las áreas más susceptibles a la contaminación, entre otros. De esta forma, estas técnicas ofrecen alternativas para la toma de decisiones más precisas y rápidas, lo que contribuye a la gestión del recurso hidrogeológico (30).

El objetivo de este trabajo fue determinar las zonas potenciales de recarga de agua subterránea en el Sistema Acuífero La Mojana, bajo condiciones de información escasa debido a la gran extensión del acuífero, el reducido número de registros de pozos y pruebas de bombeo y, especialmente, a la escala de la información cartográfica disponible.

Los resultados obtenidos proporcionan una comprensión más completa de la distribución potencial del agua subterránea en la subregión de La Mojana y ofrecen un mapa hidrogeológico prospectivo que brindará soporte técnico a una gestión más eficiente del recurso hídrico; adicionalmente, sirven como herramientas para el análisis zonificado de la susceptibilidad a la contaminación del acuífero.

Para el estudio se utilizaron diez criterios de decisión: litología, densidad de lineamientos, pendiente, geomorfología, densidad de drenaje, precipitación, clase textural y profundidad del suelo, cobertura vegetal y transmisividad, a los que se sumaron cuatro índices topográficos: rugosidad y curvatura del terreno, índice



| PARÁMETRO                       | Gradiente de la pendiente | Litología | Densidad de drenaje | Cobertura y uso del suelo | Densidad de lineamientos | Textura del suelo | Precipitación | Geomorfología | Transmisividad | ITHL | Profundidad del suelo | Curvatura del perfil | Curvatura del plano | IPT | Rugosidad | Número de Curva |
|---------------------------------|---------------------------|-----------|---------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------|---------------|---------------|----------------|------|-----------------------|----------------------|---------------------|-----|-----------|-----------------|
| Arulbajali <i>et al.</i> , 2019 | 4                         | 3         | -                   | 2                         | 3                        | 3                 | 5             | 1             | -              | 5    | -                     | 6                    | 6                   | 6   | 6         | -               |
| Ahmed y Al-Manmi, 2019          | 3                         | 1         | 6                   | 4                         | 2                        | 5                 | -             | -             | -              | -    | -                     | -                    | -                   | -   | -         | -               |
| Kumar <i>et al.</i> , 2018      | 2                         | 1         | 3                   | 1                         | -                        | 2                 | -             | -             | -              | -    | -                     | -                    | -                   | -   | -         | -               |
| Eko y Hardiman, 2018            | 4                         | 2         | 5                   | 1                         | 6                        | 3                 | 2             | -             | -              | -    | -                     | -                    | -                   | -   | -         | -               |
| Yeh <i>et al.</i> , 2016        | 3                         | 1         | 3                   | 4                         | 2                        | -                 | -             | -             | -              | -    | -                     | -                    | -                   | -   | -         | -               |
| Jasrotia <i>et al.</i> , 2016   | 3                         | -         | 4                   | 2                         | -                        | 6                 | -             | 1             | 5              | -    | -                     | -                    | -                   | -   | -         | -               |
| Badamasi <i>et al.</i> , 2016   | 3                         | 1         | 2                   | 4                         | 1                        | 3                 | 3             | 2             | -              | -    | -                     | -                    | -                   | -   | -         | -               |
| Mohmoud <i>et al.</i> , 2014    | 3                         | -         | -                   | 4                         | -                        | 1                 | 2             | -             | -              | -    | -                     | -                    | -                   | -   | -         | -               |
| Suganti <i>et al.</i> , 2013    | -                         | 2         | 4                   | 5                         | 4                        | 3                 | 4             | 1             | -              | -    | -                     | -                    | -                   | -   | -         | -               |
| Kaliraj y Chandrasekar, 2013    | 8                         | 7         | 9                   | 5                         | 1                        | 9                 | 3             | 2             | 4              | -    | 6                     | -                    | -                   | -   | -         | -               |
| Hammouri <i>et al.</i> , 2012   | 1                         | 2         | 1                   | -                         | 1                        | -                 | -             | -             | -              | -    | -                     | -                    | -                   | -   | -         | -               |

**Fuente:** Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361.

Partiendo de la comprensión de las respuestas hidrológicas y geomorfológicas, que a escala de parcela representan cada uno de los índices topográficos, resulta posible usarlos en reemplazo de otras coberturas con mayores grados de complejidad en su elaboración y clasificación; de esta forma, la integración de los índices de humedad de laderas, posición topográfica, rugosidad y curvatura del terreno, pueden sustituir apropiadamente los mapas de unidades geomorfológicas, profundidad y clases texturales del suelo y transmisividad.

### Litología

El Sistema Acuífero La Mojana cuenta con sedimentos que abarcan desde el Oligoceno hasta el Reciente con fuertes afectaciones tectónicas derivadas de la interacción de las placas Caribe y Suramérica (39-44).

Al ser la litología un indicador importante de las características hidrogeológicas del acuífero y de su sistema de recarga (45,46), se extrajeron las formaciones geológicas del Atlas Geológico de Colombia (47) y se les asignaron rangos de injerencia en el potencial de recarga según las descripciones reportadas en los diferentes estudios locales y regionales, en especial sobre las características de los afloramientos de cada unidad. Los mayores valores se otorgaron a los sedimentos no consolidados de las formaciones Sincelejo y Betulia, mientras que los más bajos fueron destinados a la Formación El Carmen y a las rocas cristalinas.

Formación Ciénaga de Oro: se trata de una secuencia de areniscas finas a conglomeráticas, limolitas, lutitas ligeramente calcáreas a carbonosas y lentes de carbón, depositada sobre el basamento del Valle Inferior del Magdalena, en ambientes que varían de marino somero en la base, a deltaicos en el resto de la columna (40,41,48-50).

Formación El Carmen: también conocida como Formación Porquera; se compone de lodolitas, shales calcáreos y algo de yeso; debido a su carácter limolítico a arcilloso se considera de muy baja permeabilidad y capacidad de infiltración (51,52). Su parte basal se depositó en ambiente marino con profundidades entre 200 m y 600 m, mientras que el segmento superior es consistente con llanuras deltaicas (49,53,54).

Formación Cerrito: también conocida como Tubará o Porquera Superior; se compone de areniscas finas a gruesas, areniscas conglomeráticas y conglomerados, con intercalaciones de lutitas fosilíferas y mantos de carbón hacia el techo (54). Se depositó en ambientes de abanicos submarinos, plataforma, borde de talud y deltaico (41,42,55). Es un acuífero regional de gran importancia en el Sistema Acuífero Bajo Cauca Antioqueño, localizado al sur del SALM.

Formación Sincelejo: es una potente unidad de areniscas de grano fino a conglomeráticas, con estratificación cruzada y variaciones locales a facies lodosas, depositada en ambientes someros de muy baja energía. Las capas de arenitas y arcillolitas están poco consolidadas, lo que indica procesos débiles de enterramiento, litificación y diagénesis (49,50,52,53,55,56). El segmento superior corresponde al acuífero de Morroa, compuesto por gravas y arcillolitas.

Formación Betulia: también llamada El Descanso y Caucasia; está compuesta por sedimentos fluviolacustres, principalmente arcillas arenáceas y limos, con cambios frecuentes de facies (51,52,57,58). La presencia de zonas arcillosas y otras arenosas, ha llevado a proponer su división en miembro superior e inferior (59-61) o sugerir que se trata de dos formaciones diferentes (62); sin embargo, Clavijo y Barrera (2001) consideran que son cambios frecuentes de facies típicos, con depositación en ambientes fluviales de muy baja energía (55).

Depósitos aluviales cuaternarios: se trata de terrazas compuestas por limos areno-arcillosos y arenas con fragmentos de roca; abanicos aluviales con depósitos mixtos que capturan la escorrentía favoreciendo la infiltración y llanuras de inundación formadas por limos, arenas y gravas pobremente consolidados (62-66).

### **Geomorfología**

Desde el punto de vista geomorfológico, el área presenta siete unidades, así:

Cono aluvial del río Cauca – Cinturón de avulsión: descrito por Martínez en 1981 como una acumulación de 100 km de largo, 75 km de ancho, que ocupa el 90 % del área de la planicie inundable de La Mojana. Presenta tres pendientes principales: N-S, SW-NE y SE-NW (67). Su parte distal termina en las depresiones cenagosas del Magdalena y del San Jorge.

El cinturón de avulsión formado sobre el cono aluvial del río Cauca, cuya área se estima en 3.457,3 km<sup>2</sup>, produce secuencias de arcillas, limos, arenas finas y cintas arenosas de configuración sinuosa, con cambios frecuentes de facies. En general, este tipo de depósitos se ha reconocido por favorecer la infiltración en áreas arcillosas (68,69).

Abanicos aluviales menores: sobre la margen izquierda del río San Jorge se presentan diferentes abanicos aluviales, entre los que resalta el abanico de Santiago (70). Este es un depósito de gran tamaño que afecta el cauce del río San Jorge y del caño Grande de Santiago a lo largo de 17 km entre las ciénagas La Villa y Santiago. Estos abanicos constituyen áreas de almacenamiento hídrico temporal que facilitan la infiltración de una porción de la escorrentía atrapada.

Paludales: se localizan principalmente en el sector septentrional de La Mojana en la zona de descarga de los caños Mojana y Panceagüita, también se observan a lo largo de la llanura de inundación del río San Jorge. Se trata de planos de inundación inclinados hacia las ciénagas, razón por la cual están principalmente compuestos por limos y arenas finas con abundante materia orgánica. Se consideran de baja capacidad de infiltración debido a la granulometría de los materiales que los componen (63).

Llanuras inundación: corresponden con los depósitos de los arroyos que drenan las formaciones Sincelejo y Betulia. Estas llanuras muestran pendientes muy bajas y granulometría mixta producto de sedimentación detrítica, por lo que ofrecen muy buenas condiciones para favorecer la recarga hídrica.

Laderas levemente inclinadas con colinas residuales: están compuestas por sedimentos poco consolidados con pendientes bajas a muy bajas y una red de drenaje dendrítica de alta densidad que favorecen los procesos de infiltración.

Colinas medias: corresponde a la cabecera del arroyo Santiago, en el municipio de Ciénaga de Oro, donde se presentan colinas medias con una red de drenaje dendrítica de baja densidad.

Colinas bajas: se presenta como un paisaje de lomerío en una franja con dirección norte – sur, localizada hacia el extremo occidental del sistema acuífero; consiste en un área de colinas alargadas con una densidad de drenaje moderada a densa. Esta zona se considera de moderada capacidad de infiltración.

Terrazas aluviales: constituidos por lentes de gravas intercalados con arenas conglomeráticas, limos y arcillas, que se consideran zonas con baja capacidad de infiltración (61,63).

Cuerpos de agua: se trata de todos los elementos del complejo cenagoso de La Mojana, cuya interacción ciénaga – río permite concluir sobre una capacidad de infiltración moderada.

### Gradiente de la pendiente

Además de influir sobre la distribución y el almacenamiento hídrico, la pendiente controla la relación entre la escorrentía y la infiltración de la precipitación en el acuífero, de esta forma, las áreas con pendientes menores muestran bajos gradientes hidráulicos que favorecen la infiltración. Por el contrario, en áreas con fuertes pendientes el flujo tendrá mayor energía y no contarán con el tiempo suficiente para que ocurra la infiltración (71–74).

El modelo de elevación digital del Sistema Acuífero La Mojana fue extraído del SRTM (75) para generar el mapa de pendientes que, posteriormente, fue reclasificado a partir de los gradientes de la pendiente, presentados por FAO (76) en la **Tabla 3-2**.

**Tabla 3-2.** Gradiente de la pendiente

| Gradiente de la pendiente | Pendiente (%) |
|---------------------------|---------------|
| Plano                     | <0,2          |
| Nivel                     | 0,2 – 0,5     |
| Cercano a nivel           | 0,5 – 1,0     |
| Muy ligeramente inclinado | 1,0 – 2,0     |
| Ligeramente inclinado     | 2,0 – 4,0     |
| Inclinado                 | 4,0 – 10,0    |
| Fuertemente inclinado     | 10,0 – 15,0   |
| Moderadamente escarpado   | 15,0 – 30,0   |
| Escarpado                 | 30,0 – 60,0   |
| Muy escarpado             | >60,0         |

**Fuente:** FAO (2009) (76).

En la mayor parte del Sistema Acuífero La Mojana, el 63,6 % presenta pendientes inferiores al 5 %; mientras que el 93,1 % del área muestra pendientes menores al 10 %.

### Textura del suelo

Las características hidráulicas de las diferentes clases texturales son factores esenciales en la identificación de las zonas potenciales de recarga hidrogeológica (37,77,78), pues la capacidad de retención hídrica y la permeabilidad del suelo son parámetros propios de cada clase (74). Las clases compuestas por partículas gruesa, como los suelos arenosos, promueven la transmisividad y los valores altos de infiltración; en tanto

que aquellas conformadas por partículas muy finas, como los suelos arcillosos densos, inducen a valores muy bajos de infiltración (34,74,79-81).

El mapa de textura del suelo del Sistema Acuífero La Mojana se preparó a partir de los mapas de suelos y zonificación de tierras de los departamentos de Bolívar (82), Córdoba (83), Magdalena (84) y Sucre (85). Estos mapas fueron reclasificados en cuatro clases texturales, según la capacidad de respuesta a los impulsos hidrológicos (76).

### **Profundidad del suelo**

La profundidad de suelo es un factor importante en términos de volumen de infiltración y tiempo requerido para alcanzar el nivel freático: los suelos más gruesos mostrarán una mayor capacidad de infiltración, mientras que los suelos delgados junto con las rocas desnudas favorecen la escorrentía superficial (34,86,87).

Para la elaboración del mapa de profundidades del suelo, se consideró de potencial muy alto aquellos suelos reportados como muy profundos, y de muy bajo potencial aquellos indicados como muy superficiales en los mapas departamentales de suelos mencionados antes.

### **Densidad de drenaje**

La densidad de drenaje, definida como la longitud total de canales por unidad de área de la cuenca (88), describe el espaciamiento y la distribución de las corrientes, o visto de otra forma, representa la cantidad de canales requeridos para drenar una cuenca (89-91). Este parámetro está controlado por la transmisividad del terreno, a mayor valor menor densidad de drenaje y viceversa (92).

La densidad de drenaje se derivó del modelo de elevación digital de la NASA (75). Los valores más bajos se asocian con baja escorrentía y tasa de infiltración comparativamente mayor, mientras que los valores altos corresponden a zonas de mayor escorrentía y, por lo tanto, menor tasa de infiltración.

### **Densidad de lineamientos**

Los lineamientos se asocian con patrones lineales derivados de actividad tectónica, como drenajes con tramos rectos, crestas topográficas y alineación de bordes de ciénagas, entre otros. A partir del modelo de elevación digital del SRTM de la NASA (75) se trazaron los lineamientos y posteriormente se determinó su densidad. En el Sistema Acuífero La Mojana resaltan los valores altos, mayores a 50 m/km<sup>2</sup>, correspondientes a las áreas de intersección de las zonas de fallas de San Jorge, Sucre y Loba, consideradas como áreas con muy alto potencial de recarga hidrogeológica.

### **Transmisividad**

Este parámetro, producto de la conductividad hidráulica promedio y el espesor saturado del acuífero, es altamente variable en condiciones de flujo no confiado (81). Para la elaboración del mapa de transmisividad se utilizó la información reportada para las diferentes unidades hidrogeológicas que componen el Sistema Acuífero La Mojana (62,64-66).

### **Uso de la tierra**

Las categorías de uso y cobertura de la tierra se reclasificaron a partir del mapa de coberturas de la tierra, elaborado por IDEAM mediante la metodología Corine Land Cover (93). Se consideran de bajo potencial las áreas urbanizadas, mineras y desnudas; a diferencia de las zonas agrícolas heterogéneas y los bosques de bajo inundable que se toman como de alto potencial (73,94).

### Número de Curva

El modelo empírico de Número de Curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos califica la capacidad del terreno para generar escorrentía superficial en función de la permeabilidad del suelo, el uso de la tierra y la humedad antecedente, que permiten evaluar tres condiciones: seca -NC<sub>I</sub>, normal -NC<sub>II</sub> y húmeda -NC<sub>III</sub>. Este último fue el utilizado para el análisis de las zonas potenciales de recarga debido a que representa la condición de suelo saturado. Los valores bajos representan mayor capacidad de infiltración y, por lo tanto, reciben la calificación más alta (38,95,96).

Para la preparación de este mapa se utilizó el método presentado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (95), la información sobre cobertura vegetal ofrecida por IDEAM (93) y los mapas departamentales de suelos elaborados por IGAC (82-85).

### Índice topográfico de humedad de laderas (ITHL)

Este índice revela la función de la topografía en los procesos hidrológicos, entre ellos el potencial de captura de humedad del terreno a partir del gradiente de la pendiente y la acumulación del flujo, cuyas representaciones están altamente correlacionadas con la profundidad y la textura del suelo (97-100). Cuanto mayor es el valor del índice, mayor la humedad de la parcela y, por lo tanto, mayor su potencial de recarga (34,101,102). La ecuación 1, presentada por Beven y Kirkby, permite obtener el ITHL a partir del modelo de elevación digital utilizando la razón entre los mapas de flujo acumulado y pendientes en radianes (97).

$$ITHL = Ln \left( \frac{\text{Flujo Acum}}{\text{Pendiente\_Rads}} \right) \quad \text{Ecuación 1}$$

### Índice de posición topográfica

Este índice es un algoritmo ampliamente utilizado en la medición y la clasificación de accidentes topográficos, pues sus resultados se correlacionan con los diferentes elementos geomorfológicos (37,103,104). Los valores obtenidos para el Sistema Acuífero La Mojana se distribuyen así: muy bajos para las zonas de paludales, bajos para las planicies inundables, moderado para las laderas inclinadas, alto para las zonas de colinas y muy alto para las crestas. El mapa se elaboró a partir del modelo de elevación digital SRTM con la fórmula propuesta por Jenness (Ecuación 2) que considera la elevación del punto evaluado ( $C_o$ ), la elevación media del vecindario ( $\hat{C}$ ) y la desviación estándar de la elevación del vecindario ( $\sigma$ ) (103).

$$IPT = \frac{C_o - \hat{C}}{\sigma} \quad \text{Ecuación 2}$$

### Índice de rugosidad del terreno

El índice de rugosidad del terreno se calcula como el cambio medio de elevación entre una celda central y sus vecinos definidos por el usuario (105). En este índice, la celda central se usa como referencia en lugar del valor promedio de las celdas dentro de la ventana móvil definida, lo que enfatiza la rugosidad. Por esta razón, es muy efectivo para resaltar las características del terreno, especialmente en un análisis a pequeña escala (106).

Este índice expresa la ondulación de la topografía, a mayor rugosidad, mayor ondulación y viceversa. La topografía ondulada es característica de regiones montañosas donde la meteorización y los procesos

geomórficos modifican continuamente el paisaje (37,105,107,108). En términos de recarga, serán las áreas con índice de rugosidad más bajo las que se clasifiquen con mayor potencial (35). El mapa de rugosidad fue elaborado a partir del modelo de elevación digital de la NASA (75).

### Mapas de curvatura

La curvatura topográfica muestra dos componentes: 1) la curvatura del perfil, que es paralela a la dirección de la máxima pendiente y refleja áreas de desaceleración y acumulación del flujo a través de sus valores cercanos a cero y negativos; y 2) la curvatura del plano, perpendicular a la dirección de máxima pendiente, que indica zonas de convergencia de flujo a través de los valores negativos (35,36,109). Los mapas de curvatura se derivaron del modelo de elevación digital.

Los rangos asignados a los criterios evaluados se presentan en la **Tabla 3-3**. Los mapas generados para los parámetros analizados se muestran en la **Figura 3-1**.

**Tabla 3-3.** Rangos asignados a los criterios evaluados

| Litología                        | Rango asignado | Área ocupada (%) | Geomorfología                          | Rango asignado | Área ocupada (%) |
|----------------------------------|----------------|------------------|--|----------------|------------------|
| Fm El Carmen                     | 0,1            | 0,3 %            | Cuerpo de agua                         | 2,5            | 2,7 %            |
| Rocas cristalinas y metamórficas | 0,1            | 0,2 %            | Paludales                              | 2,5            | 31,4 %           |
| Fm Ciénaga de Oro                | 2              | 0,7 %            | Colinas medias                         | 5              | 9,0 %            |
| Paludales                        | 4              | 26,1 %           | Laderas onduladas y colinas residuales | 5              | 0,7 %            |
| Cinturón de avulsión             | 6              | 25,3 %           | Terrazas aluviales                     | 5              | 9,1 %            |
| Depósitos aluviales              | 6              | 8,4 %            | Colinas bajas                          | 7,5            | 27,5 %           |
| Abanicos aluviales               | 8              | 2,7 %            | Llanuras de inundación                 | 7,5            | 8,2 %            |
| Fm Cerrito                       | 8              | 2,6 %            | Abanicos aluviales                     | 10             | 10,3 %           |
| Fm Betulia                       | 8              | 27,5 %           | Cinturón de avulsión                   | 10             | 1,0 %            |
| Fm Sincelejo                     | 10             | 6,1 %            |  |                |                  |

| Gradientes de la pendiente              | Rango asignado | Área ocupada (%) | Textura                    | Rango asignado | Área ocupada (%) |
|---|----------------|------------------|----------------------------|----------------|------------------|
| Plano (<0,2 %)                          | 10             | 9,0 %            | Arcillosa                  | 2,5            | 22,5 %           |
| Nivel (0,2 %-0,5 %)                     | 9              | 0,1 %            | Franco arcillosas          | 5              | 32,4 %           |
| Cercano a nivel (0,5 %-1,0 %)           | 8              | 3,5 %            | Franco limosas             | 7,5            | 22,2 %           |
| Muy ligeramente inclinado (1,0 %-2,0 %) | 7              | 11,0 %           | Arenosas – franco arenosas | 10             | 22,9 %           |
| Ligeramente inclinado (2,0 %-4,0 %)     | 6              | 26,7 %           | Profundidad del suelo      | Rango asignado | Área ocupada (%) |
| Inclinado (4,0 %-10,0 %)                | 5              | 42,8 %           | Muy superficial            | 2,5            | 37,3 %           |
| Fuertemente inclinado (10,0 %-15,0 %)   | 2              | 5,4 %            | Superficial                | 5              | 24,0 %           |
| Moderadamente escarpado (15,0 %-30,0 %) | 1              | 1,3 %            | Moderadamente profundo     | 7,5            | 36,6 %           |
| Escarpado (30,0 %-60,0 %)               | 0,5            | 0,1 %            | Muy profundo               | 10             | 2,1 %            |
| Muy escarpado (>60,0 %)                 | 0,1            | 0,1 %            |                            |                |                  |

**Capítulo 3** • Identificación de zonas potenciales de recarga hidrogeológica mediante procesos de análisis jerárquico en el sistema acuífero La Mojana

| Densidad de drenaje            | Rango asignado | Área ocupada (%) | Densidad de lineamientos       | Rango asignado | Área ocupada (%) |
|--------------------------------|----------------|------------------|--------------------------------|----------------|------------------|
| <0,50 km/km <sup>2</sup>       | 10             | 8,7 %            | <8,0 km/km <sup>2</sup>        | 2,5            | 39 %             |
| 0,51 – 1,0 km/km <sup>2</sup>  | 8              | 7,0 %            | 8,1 – 20,0 km/km <sup>2</sup>  | 5              | 32,5 %           |
| 1,01 – 1,5 km/km <sup>2</sup>  | 6              | 26,5 %           | 20,1 – 30,0 km/km <sup>2</sup> | 7,5            | 16,1 %           |
| 1,51 – 1,90 km/km <sup>2</sup> | 4              | 41,9 %           | >30,0 km/km <sup>2</sup>       | 10             | 12,4 %           |
| 1,91 – 2,20 km/km <sup>2</sup> | 2              | 9,7 %            |                                |                |                  |
| >2,21 km/km <sup>2</sup>       | 1              | 6,2 %            |                                |                |                  |

| Transmisividad                   | Rango asignado | Área ocupada (%) | Densidad de lineamientos       | Rango asignado | Área ocupada (%) |
|----------------------------------|----------------|------------------|--------------------------------|----------------|------------------|
| <50,0 m <sup>2</sup> /día        | 2,5            | 35,5 %           | <8,0 km/km <sup>2</sup>        | 2,5            | 39 %             |
| 50,1 – 100,0 m <sup>2</sup> /día | 5              | 36,9 %           | 8,1 – 20,0 km/km <sup>2</sup>  | 5              | 32,5 %           |
| >100,1 m <sup>2</sup> /día       | 7,5            | 27,6 %           | 20,1 – 30,0 km/km <sup>2</sup> | 7,5            | 16,1 %           |
|                                  |                |                  | >30,0 km/km <sup>2</sup>       | 10             | 12,4 %           |

| Número de Curva (NCIII) | Rango asignado | Área ocupada (%) | Cobertura y uso del suelo            | Rango asignado | Área ocupada (%) |
|-------------------------|----------------|------------------|--------------------------------------|----------------|------------------|
| 5,0 – 25,0              | 10             | 8,2 %            | Zonas urbanizadas, mineras, quemadas | 2,5            | 1,4 %            |
| 25,1 – 50,0             | 7,5            | 7,3 %            | Bosques, herbazales                  | 5              | 19,7 %           |
| 50,1 – 75,0             | 5              | 37,6 %           | Agrícolas, pastos, transitorios      | 7,5            | 71,0 %           |
| >75,0                   | 2,5            | 46,9 %           | Cuerpos de agua                      | 10             | 7,9 %            |

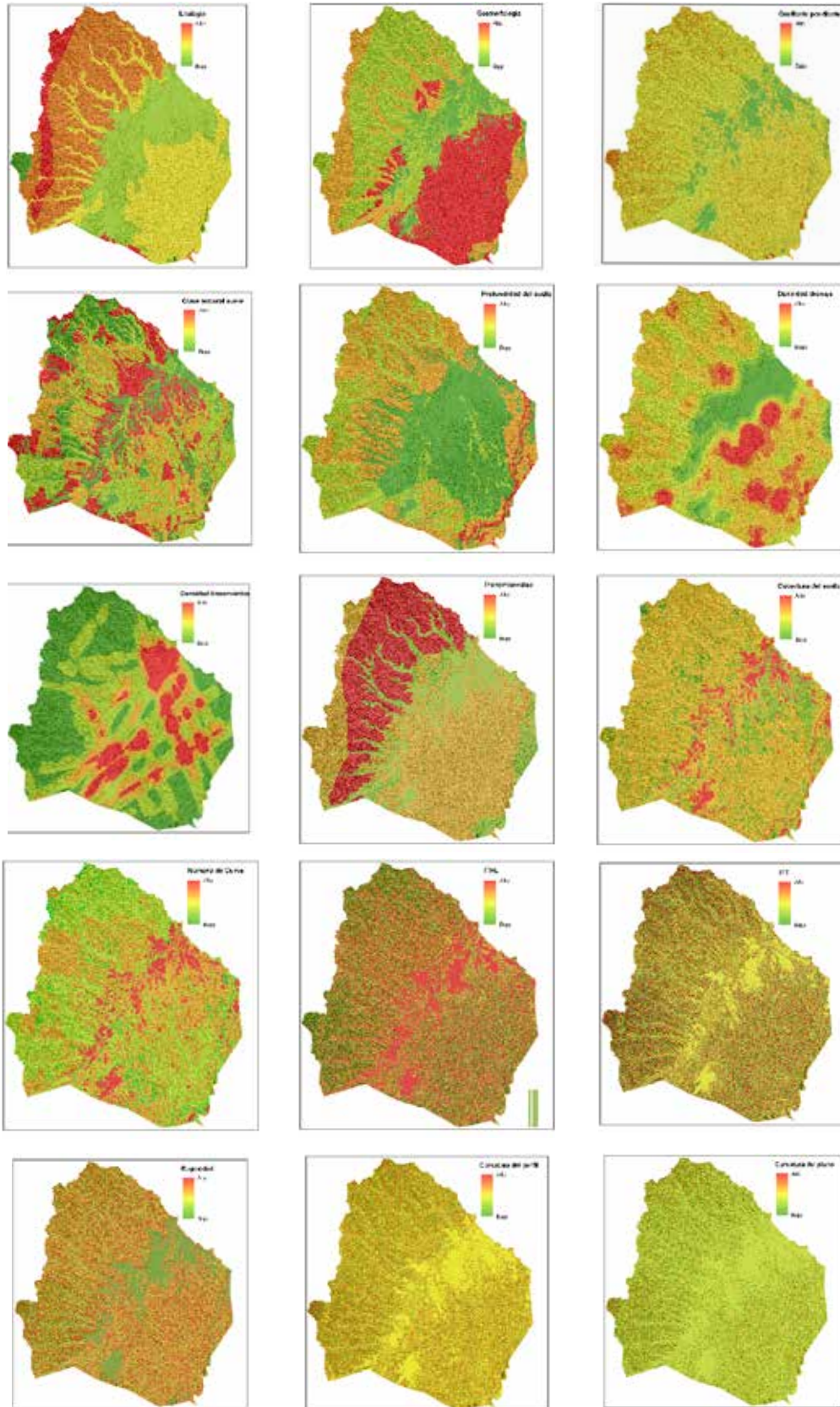
| Índice de posición topográfica | Rango asignado | Área ocupada (%) | Índice topográfico de humedad de ladera | Rango asignado | Área ocupada (%) |
|--------------------------------|----------------|------------------|---|----------------|------------------|
| <15,0                          | 10             | 21,5 %           | <5,50                                   | 2,5            | 24,2 %           |
| 15,1 – 45,0                    | 8              | 43,7 %           | 5,50 – 6,20                             | 5              | 25,2 %           |
| 45,1 – 75,0                    | 6              | 12,3 %           | 6,21 – 7,70                             | 7,5            | 25,7 %           |
| 75,1 – 150,0                   | 4              | 18,0 %           | >7,70                                   | 10             | 24,9 %           |
| >150,0                         | 2              | 4,5 %            |   |                |                  |

| Curvatura del perfil | Rango asignado | Área ocupada (%) | Índice de rugosidad topográfica | Rango asignado | Área ocupada (%) |
|----------------------|----------------|------------------|---------------------------------|----------------|------------------|
| < -1,1               | 10             | 0,8 %            | <0,23                           | 10             | 5,4 %            |
| -1,11 – -0,02        | 8              | 26,2 %           | 0,24 – 0,41                     | 8              | 15,7 %           |
| -0,02 – 0,02         | 6              | 39,0 %           | 0,42 – 0,52                     | 6              | 35,2 %           |
| 0,02 – 1,1           | 4              | 33,1 %           | 0,53 – 0,64                     | 4              | 32,0 %           |
| >1.1                 | 2              | 0,9 %            | >0,64                           | 2              | 11,7 %           |

| Curvatura del plano | Rango asignado | Área ocupada (%) |
|---------------------|----------------|------------------|
| < -0,6              | 10             | 17,1 %           |
| -0,6 – -0,05        | 8              | 1,4 %            |
| -0,05 – 0           | 6              | 64,3 %           |
| 0 – 0,1             | 4              | 1,6 %            |
| >0,1                | 2              | 15,6 %           |

Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361.

Figura 3-1. Mapas de los parámetros analizados



Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361 a partir de las fuentes citadas para cada criterio.

### Análisis jerárquico

El proceso de análisis jerárquico, desarrollado por Saaty (1980), es una herramienta de apoyo a la toma de decisiones complejas que se ejecuta en tres pasos (110): el primero es la creación de la matriz de comparación por parejas de factores influyentes sobre el fenómeno analizado (23). Esta matriz reduce la complejidad del análisis a un solo nivel obteniéndose el orden de jerarquía relativa para cada uno de los criterios juzgados (34,111). En este paso se califican los pares utilizando una escala de importancia relativa, donde uno indica igual relevancia y nueve la importancia absoluta de un elemento sobre el otro.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{...} & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{33} & a_{...} & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{...} & a_{3n} \\ a_{...} & a_{...} & a_{...} & a_{...} & a_{...n} \\ a_{n1} & a_{...} & a_{...} & a_{...} & a_{nn} \end{bmatrix}$$

Donde  $a^n$  muestra la n-ésima unidad indicadora y  $a^{nn}$  es el elemento de la matriz de evaluación.

El segundo paso consiste en determinar los pesos normalizados como se muestra en la Ecuación 3; donde W es el autovector y GM es la media geométrica de cada fila de la matriz.

$$W_n = \frac{MG}{\sum_{n-1} MG} \quad \left| \text{Ecuación 3} \right.$$

El último paso, es la comprobación de la consistencia (Ecuación 4) de los pesos normalizados asignados a los criterios mediante el cálculo del índice de consistencia que debe ser inferior a 0,01; en caso de no cumplirse esta condición será necesario reiniciar la comparación de los pares.

$$RC = \frac{IC}{ICA} \quad \left| \text{Ecuación 4} \right.$$

Donde RC es el radio de consistencia, IC es el índice de consistencia, calculado usando la ecuación 5, e ICA es el índice de consistencia aleatorio, que toma valores de 0,00 si el tamaño de la matriz es de 1 o 2, y toma valores de 0,52, 0,89, 1,11, 1,25, 1,35, 1,40, 1,45, 1,49 y 1,51 para un tamaño de matriz de 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11, respectivamente (110)

$$IC = \frac{(\lambda_{m\acute{a}x} - n)}{(n - 1)} \quad \left| \text{Ecuación 5} \right.$$

Se seleccionaron cuatro configuraciones diferentes de variables con el fin de identificar los impactos de estas en la identificación de las zonas potenciales de recarga hidrogeológica: grupo 1, compuesto por las ocho variables regionalizadas de uso más frecuente en la literatura especializada; grupo 2, conformado por la densidad de lineamientos, todos los índices topográficos y el hidrológico; grupo 3, integrado por los tres índices topográficos seleccionados y el descriptor hidrológico; y grupo 4, creado con los dieciséis parámetros analizados.

La escala de Saaty fue gestionada y validada mediante juicio de expertos y los cálculos del proceso de análisis jerárquico se ejecutaron en la aplicación AHP Online System –AHP-OS (112).

## Resultados y discusión

El análisis de los criterios principales, utilizados en la literatura especializada con fines de identificación de las zonas potenciales de recarga hidrogeológica y presentados en la **Tabla 3-4.**, muestra que el 52 % de las investigaciones considera la litología como el factor de mayor influencia en la delimitación de zonas potenciales de recarga hidrogeológica, seguida por el gradiente de la pendiente, la densidad de lineamientos y la geomorfología, con 16 % cada uno.

**Tabla 3-4.** Frecuencia de uso de criterios en la literatura especializada

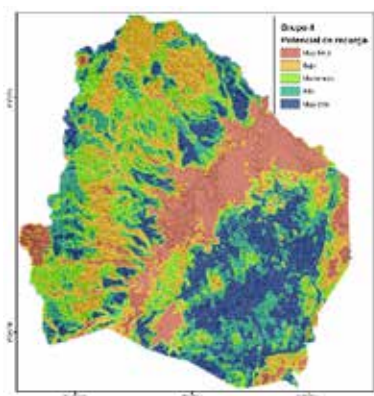
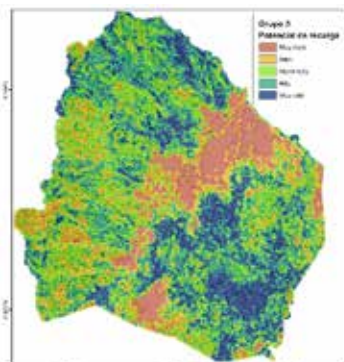
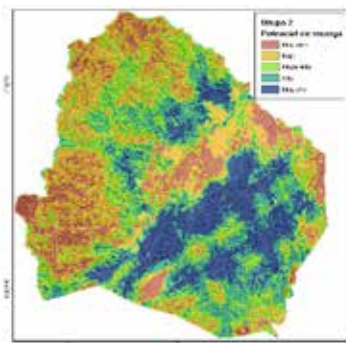
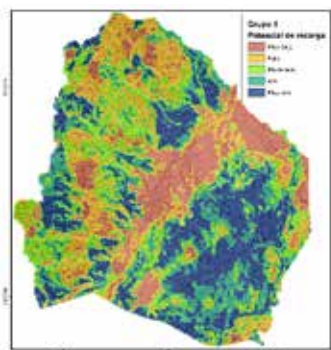
| Criterio                  | Uso    | Criterio |        |        |        |
|---------------------------|--------|----------|--------|--------|--------|
|                           |        | 1°       | 2°     | 3°     | 4°     |
| Gradiente de la pendiente | 96,0 % | 16,0 %   | 12,0 % | 32,0 % | 16,0 % |
| Litología                 | 88,0 % | 52,0 %   | 16,0 % | 12,0 % | 0,0 %  |
| Densidad de drenaje       | 88,0 % | 4,0 %    | 8,0 %  | 28,0 % | 20,0 % |
| Cobertura y uso del suelo | 84,0 % | 8,0 %    | 24,0 % | 0,0 %  | 28,0 % |
| Densidad de lineamientos  | 76,0 % | 16,0 %   | 12,0 % | 12,0 % | 12,0 % |
| Textura del suelo         | 76,0 % | 4,0 %    | 8,0 %  | 16,0 % | 12,0 % |
| Precipitación             | 52,0 % | 4,0 %    | 16,0 % | 20,0 % | 4,0 %  |
| Geomorfología             | 52,0 % | 16,0 %   | 20,0 % | 8,0 %  | 4,0 %  |
| Transmisividad            | 16,0 % | -        | 4,0 %  | -      | 8,0 %  |
| ITHL                      | 16,0 % | -        | 4,0 %  | 4,0 %  | -      |
| Profundidad del suelo     | 12,0 % | -        | -      | -      | 4,0 %  |
| Curvatura del perfil      | 12,0 % | -        | 4,0 %  | -      | -      |
| Curvatura del plano       | 12,0 % | -        | -      | -      | -      |
| IPT                       | 8,0 %  | -        | -      | -      | -      |
| Rugosidad                 | 8,0 %  | -        | -      | -      | -      |
| Número de Curva           | 4,0 %  | -        | -      | 4,0 %  | -      |

**Fuente:** Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361 a partir de autores indicados en la **Tabla 3-1.**

El análisis de los cuatro modelos de zonificación potencial de recarga hidrogeológica (**Tabla 3-5**), mostró patrones consistentes y diferencias significativas derivadas de los insumos utilizados, así:

1. Consistencia entre modelos: Los grupos 1 y 3 mostraron las mayores similitudes en resultados. El grupo 1, basado en ocho variables comúnmente utilizadas en la literatura, y el grupo 3, compuesto por tres índices topográficos y el Número de Curva, proporcionaron las zonificaciones más coherentes.

**Tabla 3-5.** Resultados de la ponderación de parámetros



| Parámetros                | Ponderación |
|---------------------------|-------------|
| Densidad de lineamientos  | 21,7 %      |
| Gradiente de la pendiente | 15,7 %      |
| Litología                 | 12,8 %      |
| Cobertura y uso del suelo | 11,6 %      |
| Textura del suelo         | 9,4 %       |
| Geomorfología             | 8,4 %       |
| Profundidad del suelo     | 7,5 %       |
| Densidad de drenaje       | 7,5 %       |
| Precipitación             | 5,5 %       |

| Parámetros               | Ponderación |
|--------------------------|-------------|
| Densidad de lineamientos | 19,6 %      |
| ITHL                     | 18,3 %      |
| Rugosidad                | 17,9 %      |
| Densidad de drenaje      | 12,6 %      |
| IPT                      | 11,7 %      |
| Curvatura del perfil     | 10,3 %      |
| Curvatura del plano      | 9,6 %       |

| Parámetros          | Ponderación |
|---------------------|-------------|
| Número de Curva     | 34,0 %      |
| ITHL                | 28,1 %      |
| Rugosidad           | 23,9 %      |
| Densidad de drenaje | 14,0 %      |

| Parámetros                | Ponderación |
|---------------------------|-------------|
| Densidad de lineamientos  | 13,2 %      |
| ITHL                      | 10,4 %      |
| Gradiente de la pendiente | 9,2 %       |
| Geomorfología             | 7,9 %       |
| IPT                       | 6,7 %       |
| Número de curva           | 6,6 %       |
| Uso y cobertura del suelo | 6,4 %       |
| Litología                 | 5,8 %       |
| Textura del suelo         | 5,3 %       |
| Transmisividad            | 5,1 %       |
| Rugosidad                 | 4,9 %       |
| Profundidad del suelo     | 4,5 %       |
| Precipitación             | 3,5 %       |
| Densidad de drenaje       | 3,5 %       |
| Curvatura del plano       | 3,5 %       |
| Curvatura del perfil      | 3,5 %       |

**Fuente:** Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361.

2. Importancia de la geomorfología: los índices topográficos, que reflejan el comportamiento hidrológico superficial, destacaron la importancia de las zonas de falla y el cinturón de avulsión para la captura hídrica y la recarga hidrogeológica.
3. Zonas con alto potencial de recarga: el cono aluvial del río Cauca emergió como un área relevante y resaltando las evidencias geomorfológicas de la actividad tectónica, en particular de las fallas de Sucre, San Jorge y Loba; así como las características propias de los cinturones de avulsión, como múltiples canales aluviales y áreas de almacenamiento hídrico.
4. Abanicos aluviales occidentales: los cuatro modelos resaltaron la importancia de los abanicos aluviales al oeste de la llanura de inundación del río San Jorge, con el abanico de Santiago que se destaca por su tamaño y potencial de recarga.
5. Influencia de las zonas de falla: la relevancia de estas estructuras geológicas se resaltó en los cuatro modelos, incluso en el grupo 3, donde los índices topográficos capturaron su impacto de forma indirecta.
6. Efecto de la proximidad a los canales aluviales: los grupos 2 y 3, basados en índices topográficos, enfatizaron la cercanía a los canales aluviales como un factor favorable para la recarga. Sin embargo, en los grupos 1 y 4, la inclusión de variables regionalizadas con escalas 1:100.000 pareció moderar esta influencia.
7. Utilidad de la información obtenida de modelos de elevación digital: el grupo 2, obtenido a partir de seis índices topográficos y la densidad de lineamientos, muestra con más detalle las diferentes categorías de potencial hidrogeológico respecto a otros tres grupos. Por su parte, el grupo 3 sobrestima la recarga de las serranías de San Jacinto y San Jerónimo.

En cuanto a la distribución porcentual de áreas con potencial de recarga, existe una notable variación en la distribución de las categorías de zona potencial de recarga hidrogeológica entre los cuatro grupos, que se explica por los diferentes enfoques y variables utilizadas, como se muestra en la siguiente **Tabla 3-6**.

**Tabla 3-6.** Porcentaje de área clasificada según el potencial de recarga hidrogeológica

| ZPRH     | Grupo 1 | Grupo 2 | Grupo 3 | Grupo 4 |
|----------|---------|---------|---------|---------|
| Muy baja | 16,5    | 7,3     | 9,2     | 16,5    |
| Baja     | 21,4    | 11,4    | 13,1    | 18,9    |
| Moderada | 19,8    | 22,2    | 38,4    | 21,1    |
| Alta     | 20,5    | 26,9    | 33,9    | 22,3    |
| Muy alta | 21,8    | 32,2    | 5,3     | 21,1    |

**Fuente:** Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361.

Los grupos 1 y 4 presentan distribuciones más uniformes con porcentajes que oscilan entre 16,5 % y 22,3 %, lo cual parece reflejar el carácter regional de la información utilizada. Adicionalmente, estos grupos coinciden en la valoración del potencial como muy bajo, con 16,5 %.

Por su parte, el grupo 2 muestra una tendencia hacia un mayor potencial de recarga, con un 59,1 % del área, en las categorías de alta a muy alta potencialidad. Mientras que el grupo 3 presenta los mayores porcentajes en la clasificación moderada con 38,4 % y aunque también señala valores altos para alto potencial, es el más conservador sobre la categoría de muy alto potencial, con tan solo 5,3 %.

Al comparar el grupo 2 con los grupos 1 y 4, se observan diferencias significativas en las áreas de mayor y potencial de recarga, donde el grupo 2 es el más optimista en su clasificación para ambas comparaciones. El grupo 2 parece mostrar mayor sensibilidad a factores que favorecen la recarga, en tanto que los grupos 1 y 4 distribuyen los porcentajes con más uniformidad entre todas las categorías.

La comparación entre los grupos 1 y 3 sugiere que, aunque ambos identifican un potencial de recarga favorable, difieren significativamente en la clasificación de las áreas con potencial muy alto y moderado.

Los grupos 1 y 4 son altamente concordantes en sus clasificaciones y parecen reflejar las características de las variables regionalizadas y disponibles a escalas pequeñas de 1:100.000.

Los grupos 2 y 3 son más favorables a la recarga que los anteriores; sin embargo, difieren en la distribución del potencial de recarga, donde el grupo 2 es el más optimista en la clasificación muy alto potencial. Por su parte, el grupo 3 se concentra más en las categorías moderado y alto.

En resumen, los grupos 2 y 4 presentan las diferencias más significativas al evaluar el potencial de recarga hidrogeológica. El grupo 2 es más optimista al reflejar una mayor sensibilidad a los factores que favorecen la recarga, identificando una mayor proporción de áreas con alto y muy alto potencial. Por el contrario, el grupo 4 ofrece una perspectiva conservadora, distribuyendo las áreas más uniformemente entre todas las categorías de potencial.

Un resultado importante para la gestión del recurso hidrogeológico en zonas con información escasa es la consistencia de los resultados obtenidos a partir de los índices topográficos derivados de modelos de elevación digital, frente al uso de las ocho variables regionalizadas más usadas en la literatura especializada y que presentan altas incertidumbres debido a las escalas de la información georreferenciada y las metodologías de captura de datos.

## Conclusiones

Los resultados obtenidos con los ocho parámetros más utilizados en la literatura son altamente coincidentes con los logrados utilizando el Número de Curva, el índice de humedad de laderas, la rugosidad y la densidad de drenaje (Grupo 3). Esta combinación se ofrece como una muy buena alternativa para el análisis de sistemas acuíferos con poca información.

El peso de las variables regionalizadas, representadas por grandes polígonos, incrementan las áreas consideradas como de muy bajo potencial de recarga en la zona de paludales y en la llanura de inundación del río San Jorge; por el contrario, cuando el grupo analizado es dominado por los índices topográficos, el potencial aumenta notablemente en estas regiones.

El número de curva muestra un mejor desempeño en la identificación de zonas potenciales de recarga al combinarse con índices topográficos, en particular con el índice topográfico de humedad de ladera y con la rugosidad. Cuando participa en otras combinaciones que incluyen otras variables regionalizadas tiende a reducir la capacidad de recarga de áreas con alto potencial, como los afloramientos de la Formación Sincelejo y los abanicos aluviales.

Debido a los pocos datos utilizados para asignar la transmisividad a las unidades litológicas, este parámetro ofrece muy bajo grado de certeza en los modelos, razón por la cual no se consideró apropiado continuar utilizándolo.

El grupo que incluye los dieciséis parámetros no arrojó los mejores resultados debido a que las variables regionalizadas, como la textura del suelo, la profundidad del suelo y la litología, tienden a opacarse entre sí.

Contrario a lo observado en otros sistemas acuíferos, la precipitación no ocupó un lugar destacable entre los parámetros evaluados debido a la homogeneidad de su distribución. Su inclusión tendió a reducir el potencial de recarga de áreas de reconocida importancia regional como los afloramientos de la Formación Sincelejo.

El uso de índices topográficos derivados de los modelos de elevación digital se ofrece como una herramienta rápida y confiable que facilita la comprensión y la evaluación de las zonas potenciales de recarga con niveles de certeza aceptables, en especial en sistemas acuíferos donde la información existente sea escasa o existan dudas sobre su calidad.

El análisis requerido de los principales parámetros que intervienen en los procesos de infiltración y percolación, como parte de la implementación de la metodología de delimitación de las áreas potenciales de recarga de aguas subterráneas, proporciona una mejor comprensión del sistema acuífero y de los fenómenos hidrogeológicos asociados.

Por lo anterior, tanto la ejecución de la metodología para la evaluación de zonas potenciales de recarga de aguas subterráneas, como los resultados que ofrece, resultan de gran importancia para la planificación y la gestión del recurso hidrogeológico.

### Agradecimientos

El presente trabajo se financió a través del Fondo Ciencia Tecnología e Innovación del Sistema General de Regalías como parte del proyecto “Implementación de estrategias de gestión de riesgo en el manejo integral de zonas de recarga de los acuíferos utilizados como fuente de abastecimiento de las comunidades de la subregión Mojana, departamento de Sucre” código BPIN 2020000100361.

### Referencias

1. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Estudio Nacional del Agua, 2014. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM); 2015. p. 496.
2. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Estudio Nacional del Agua 2018 [Internet]. Bogotá D.C.; 2019. p. 452. Disponible en: <https://cta.org.co/biblionet/estudio-nacional-del-agua-2018/>
3. Instituto Regional del Agua - Iragua. Plan de ordenamiento del recurso hídrico de la cuenca baja del río San Jorge. Inédito. Montería: Corpomojana y Universidad de Córdoba; 2017.
4. Instituto Regional del Agua - Iragua. Estudio regional del agua de la cuenca baja del río San Jorge, jurisdicción de Corpomojana. Inédito. Montería: Corpomojana y Universidad de Córdoba; 2018.
5. Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE. Proyecciones de población a nivel municipal. Período 2018 – 2035 [Internet]. 2020. Disponible en: [https://www.dane.gov.co/files/censo2018/proyecciones-de-poblacion/Municipal/anexo-proyecciones-poblacion-Municipal\\_Sexo\\_2018-2035.xlsx](https://www.dane.gov.co/files/censo2018/proyecciones-de-poblacion/Municipal/anexo-proyecciones-poblacion-Municipal_Sexo_2018-2035.xlsx)
6. Vries JJ, Simmers I. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeol J.* 2002 Feb;10(1):5-17.
7. Lanini S, Hevin G, Le Cointe P, Pinson S, Thieblemont R, Caballero Y. Present and future potential groundwater recharge at European scale. *Bur Rescherches Géologiques Minières - BRGM* [Internet]. 2021. Disponible en: [http://www.indecis.eu/docs/Deliverables/Deliverable\\_6.4\\_AnnexC.pdf](http://www.indecis.eu/docs/Deliverables/Deliverable_6.4_AnnexC.pdf)
8. Solomon S, Quiel F. Groundwater study using remote sensing and geographic information systems (GIS) in the central highlands of Eritrea. *Hydrogeol J.* 2006 Oct 4;14(6):1029-41.
9. Allafta H, Opp C, Patra S. Identification of Groundwater Potential Zones Using Remote Sensing and GIS Techniques: A Case Study of the Shatt Al-Arab Basin. *Remote Sens.* 2020 Dec 31;13(1):112.
10. Escobar J, Betancur T, García E, Martínez C, Palacio P. Análisis jerárquico ponderado aplicado a la identificación de recarga y flujos regionales en acuíferos. 2017;13(24):37-48.
11. Betancur T, Duque JC, Martínez C, García DA, Villegas PP, Paredes V. Delimitación de las potenciales zonas de recarga: caso de estudio: acuífero multicapa del eje bananero del Urabá Antioqueño-Colombia. *Rev Politécnica.* 2020 Dec;16(32):41-55.

12. Salazar D. Estimation of groundwater recharge potential using MIF techniques in the Tatacoa desert, Huila, Colombia. Univ EAFIT [Internet]. 2022. Disponible en: <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/31475>
13. Keeney RL, Wood EF. An illustrative example of the use of multiattribute utility theory for water resource planning. *Water Resour Res.* 1977 Aug;13(4):705-12.
14. Mallick J, Khan RA, Ahmed M, Alqadhi SD, Alsubih M, Falqi I, *et al.* Modeling Groundwater Potential Zone in a Semi-Arid Region of Aseer Using Fuzzy-AHP and Geoinformation Techniques. *Water.* 2019 Dec 16;11(12):2656.
15. Rajasekhar M, Raju G, Sreenivasulu Y, Raju R. Delineation of groundwater potential zones in semi-arid region of Jilledubanderu river basin, Anantapur District, Andhra Pradesh, India using fuzzy logic, AHP and integrated fuzzy-AHP approaches. *HydroResearch.* 2019 Dec;2:97-108.
16. Etikala B, Golla V, Li P, Renati S. Deciphering groundwater potential zones using MIF technique and GIS: A study from Tirupati area, Chittoor District, Andhra Pradesh, India. *HydroResearch.* 2019 Jun;1:1-7.
17. Raju R, Raju G, Rajasekhar M. Identification of groundwater potential zones in Mandavi River basin, Andhra Pradesh, India using remote sensing, GIS and MIF techniques. *HydroResearch.* 2019 Dec;2:1-11.
18. Lilienfeld A, Asmild M. Estimation of excess water use in irrigated agriculture: A Data Envelopment Analysis approach. *Agric Water Manag.* 2007 Dec;94(1-3):73-82.
19. Alamanos A, Mylopoulos N, Loukas A, Gaitanaros D. An Integrated Multicriteria Analysis Tool for Evaluating Water Resource Management Strategies. *Water.* 2018 Dec 7;10(12):1795.
20. Roozbahani A, Ebrahimi E, Banihabib ME. A Framework for Ground Water Management Based on Bayesian Network and MCDM Techniques. *Water Resour Manag.* 2018 Dec;32(15):4985-5005.
21. Arabameri A, Rezaei K, Cerda A, Lombardo L, Rodrigo-Comino J. GIS-based groundwater potential mapping in Shahroud plain, Iran. A comparison among statistical (bivariate and multivariate), data mining and MCDM approaches. *Sci Total Environ.* 2019 Mar;658:160-77.
22. Sapkota M, Arora M, Malano H, Sharma A, Moglia M. Integrated Evaluation of Hybrid Water Supply Systems Using a PROMETHEE–GAIA Approach. *Water.* 2018 May 8;10(5):610.
23. Saaty T. How to make a decision: the analytic hierarchy process. *Interfaces.* 1994;24(6):19-43.
24. Jhariya DC, Kumar T, Gobinath M, Diwan P, Kishore N. Assessment of groundwater potential zone using remote sensing, GIS and multi criteria decision analysis techniques. *J Geol Soc India.* 2016 Oct;88(4):481-92.
25. Souissi D, Msaddek MH, Zouhri L, Chenini I, El May M, Dlala M. Mapping groundwater recharge potential zones in arid region using GIS and Landsat approaches, southeast Tunisia. *Hydrol Sci J.* 2018 Jan 25;63(2):251-68.
26. Andualem TG, Demeke GG. Groundwater potential assessment using GIS and remote sensing: A case study of Guna tana landscape, upper blue Nile Basin, Ethiopia. *J Hydrol Reg Stud.* 2019 Aug;24:100610.
27. Fenta AA, Kifle A, Gebreyohannes T, Hailu G. Spatial analysis of groundwater potential using remote sensing and GIS-based multi-criteria evaluation in Raya Valley, northern Ethiopia. *Hydrogeol J.* 2015 Feb;23(1):195-206.
28. Aykut T. Determination of groundwater potential zones using Geographical Information Systems (GIS) and Analytic Hierarchy Process (AHP) between Edirne-Kalkansogut (northwestern Turkey). *Groundw Sustain Dev.* 2021 Feb;12:100545.
29. Moreno J. El proceso analítico Jerárquico (AHP). En: Caballero R, Fernández GM, editores. *Toma de decisiones con criterios múltiples.* Madrid: Revista de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA; 2002.
30. Georgakakos KP, Graham NE. Potential Benefits of Seasonal Inflow Prediction Uncertainty for Reservoir Release Decisions. *J Appl Meteorol Climatol.* 1 de mayo de 2008;47(5):1297-321.

31. Minár J, Evans IS. Elementary forms for land surface segmentation: The theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. *Geomorphology*. marzo de 2008;95(3-4):236-59.
32. Castro M, Peralta N, Domenech M, Costa J. Relación cuantitativa entre atributos topográficos y rendimiento. Reporte técnico. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria – INTA; 2012.
33. Roa-Lobo J, Kamp U. Uso del índice topográfico de humedad (ITH) para el diagnóstico de la amenaza por desborde fluvial, Trujillo-Venezuela. *Rev Geográfica Venez*. 2012;53(1):109-26.
34. Yıldırım Ü. Identification of Groundwater Potential Zones Using GIS and Multi-Criteria Decision-Making Techniques: A Case Study Upper Coruh River Basin (NE Turkey). *ISPRS Int J Geo-Inf*. 8 de junio de 2021;10(6):396.
35. Yifru BA, Mitiku DB, Tolera MB, Chang SW, Chung IM. Groundwater Potential Mapping Using SWAT and GIS-Based Multi-Criteria Decision Analysis. *KSCE J Civ Eng*. agosto de 2020;24(8):2546-59.
36. Razavi S, Sadeghi A, Choi SM. Groundwater Potential Mapping Using an Integrated Ensemble of Three Bivariate Statistical Models with Random Forest and Logistic Model Tree Models. *Water*. 31 de julio de 2019;11(8):1596.
37. Arulbalaji P, Padmalal D, Sreelash K. GIS and AHP Techniques Based Delineation of Groundwater Potential Zones: a case study from Southern Western Ghats, India. *Sci Rep*. 14 de febrero de 2019;9(1):2082.
38. Dinagarapandi P, Kothandaraman S, Kuppusamy M. Delineation of potential groundwater zones based on multicriteria decision making technique. *J Groundw Sci Eng*. 2019;8(2):55-69.
39. Duque Caro H. Geotectónica y evolución de la región noroccidental colombiana. Informe No. 1750. *Boletín geológico, Ingeominas*. 1978;23(3):3-33.
40. Reyes-Santos J, Mantilla M, González J. Regiones Tectono-Sedimentarias del Valle Inferior del Magdalena, Colombia. En: 7th Simposio Bolivariano - Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas [Internet]. Caracas, Venezuela, European Association of Geoscientists & Engineers; 2000. p. 310-33. Disponible en: <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609-pdb.118.021esp>
41. Reyes-Harker A, Montenegro B, Gómez P. Tectonoestratigrafía y evolución geológica del Valle Inferior del Magdalena. *Bol Geol*. 2004;26(42):19-38.
42. Graterol V. Levantamiento aerogravimétrico y aeromagnético. Programa Adquisición Procesamiento e Interpretación de datos de Aeromagnetogravimetría en el Litoral Caribe - Contrato No: 073. Cuencas de Sinú, San Jacinto, Plato y San Jorge. Agencia Nacional de Hidrocarburos; 2006.
43. Arminio J, Vega R, García E, Yoris F, Lugo J, Bertorelli G. Petroleum Geology and Exploration of the La Creciente gas field Lower Magdalena Basin, Colombia. En: Cartagena de Indias; 2009.
44. Mora JA, Oncken O, Le Breton E, Ibañez-Mejía M, Veloza G, Mora A, et al. Formation and evolution of the Lower Magdalena Valley Basin and San Jacinto fold belt of northwestern Colombia: Insights from Upper Cretaceous to recent tectono-stratigraphy. En: *The Geology of Colombia* [Internet]. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 37. 2020. p. 21-66. (Gómez J, Mateus-Zabala D. Paleogene – Neogene; vol. 3). Disponible en: <https://www2.sgc.gov.co/LibroGeologiaColombia/Paginas/v3ch2.aspx>
45. Ganapuram S, Kumar GTV, Krishna IVM, Kahya E, Demirel MC. Mapping of groundwater potential zones in the Musi basin using remote sensing data and GIS. *Adv Eng Softw*. julio de 2009;40(7):506-18.
46. Gupta M, Srivastava PK. Integrating GIS and remote sensing for identification of groundwater potential zones in the hilly terrain of Pavagarh, Gujarat, India. *Water Int*. 13 de abril de 2010;35(2):233-45.
47. Nivia J, Montes N, Diederix H, Gómez J. Atlas geológico de Colombia 2015 [Internet]. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá; 2015. Disponible en: [https://www2.sgc.gov.co/MGC/Paginas/agg\\_500K2015.aspx](https://www2.sgc.gov.co/MGC/Paginas/agg_500K2015.aspx)

48. Duque Caro H. Guidebook to the Geology of the Monteria Area [Internet]. Bogotá (Colombia): Colombian Society of Petroleum Geologists and Geophysicists; 1973. 34 p. (Annual Field trip). Disponible en: <https://books.google.com.co/books?id=j8FOAQAIAAJ>
49. Guzmán G, Gómez L, Serrano B. Geología de los cinturones del Sinú, San Jacinto y borde oriental del Valle Inferior del Magdalena, Caribe Colombiano. Escala 1:300.000 [Internet]. 2004. Disponible en: <https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=48402>
50. Bermúdez HD, Alvarán M, Grajales JA, Restrepo LC, Rosero JS, Guzmán C, et al. Estratigrafía y evolución geológica de la secuencia sedimentaria del Cinturón Plegado de San Jacinto. En Paipa - Boyacá: Universidad de Caldas y Agencia Nacional de Hidrocarburos; 2009. Disponible en: <http://rgdoi.net/10.13140/2.1.5072.7367>
51. De Porta J. Lexique stratigraphique international. Vol. 5, Amérique Latine : Fasc. 4b, Colombie : 2. Tertiaire et quaternaire [Internet]. Vol. V. Paris: Centre National de la Recherche Scientifique; 1974. 409 p. Disponible en: <https://books.google.com.co/books?id=1Yu3jgEACAAJ>
52. Rodríguez G, Zapata G, Bermúdez J. Cartografía geológica de la Plancha 62 –La Ye, departamento de Córdoba y Sucre. Servicio Geológico Colombiano; 2013.
53. Dueñas J H, Duque C H. Geología del cuadrángulo F-8, Planeta Rica. Bol Geológico. 1 de enero de 1981;24(1):1-36.
54. Flinch JF. Structural Evolution of the Sinu-Lower Magdalena Area (Northern Colombia). En: The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon Habitats, Basin Formation and Plate Tectonics [Internet]. American Association of Petroleum Geologists; 2003. p. 776-96. Disponible en: <https://pubs.geoscienceworld.org/books/book/1286/chapter/107142145>
55. Clavijo J, Barrera R. Geología de las planchas 44 –Sincelejo y 52 –Sahagún. Escala 1:100.000. Memoria explicativa. Instituto Colombiano de Geología y Minería - INGEOMINAS actual Servicio Geológico Colombiano; 2001.
56. Duque-Caro H. Neogene stratigraphy, paleoceanography and paleobiogeography in northwest South America and the evolution of the Panama seaway. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol. abril de 1990;77(3-4):203-34.
57. Kassem T, Cáceres C, Cuacalón I. Geología del Cuadrángulo E-8 (Sincelejo). Informe inédito. Servicio Geológico Nacional; 1967.
58. González H. Mapa geológico del Departamento de Antioquia; geología, recursos minerales y amenazas potenciales. Escala 1:400.000. Memoria explicativa [Internet]. Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear - INGEOMINAS; 2001 p. 241. (Memoria explicativa). Disponible en: <https://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010040024267/documento/pdf/0101242671101000.pdf>
59. Huguett A, Cañas H, Barrera R, Daconte R. Hidrogeología en el corregimiento de Santiago Apostol y el municipio de Caimito, departamento de Sucre. Convenio bilateral entre los gobiernos de Colombia y Holanda. Proyecto Abastecimiento de agua potable en algunas poblaciones de los departamentos de Atlántico, Bolívar, Córdoba y Sucre. [Internet]. Cartagena: INGEOMINAS; 1988. Disponible en: [https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=11974&shelfbrowse\\_itemnumber=11878](https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=11974&shelfbrowse_itemnumber=11878)
60. Barrera R. Teledetección geológica de la Plancha 62 Colomboy (Córdoba). Informe inédito [Internet]. Instituto de Investigación en geociencias, Minería y Química -Ingeominas; 1995. Disponible en: <https://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010010020357/documento/pdf/0101203571101000.pdf>
61. Instituto Colombiano de Geología y Minería - Ingeominas. Mapa hidrogeológico de Córdoba, escala 1:250.000. Proyecto de exploración y evaluación de aguas subterráneas (RS1\_03) [Internet]. Ingeominas; 2004. Disponible en: <https://recordcenter.sgc.gov.co/B3/12006025002784/documento/pdf/0101027841101000.pdf>

62. Vargas M. Memoria técnica del mapa de aguas subterráneas del departamento de Sucre en escala 1:250.000: exploración y evaluación de aguas subterráneas RS1\_02. Bogotá: INGEOMINAS –actual Servicio Geológico Colombiano; 2002.
63. González H, Londoño A. Mapa geológico del departamento de Córdoba: geología, recursos minerales y amenazas naturales. Escala 1: 250.000 [Internet]. INGEOMINAS –actual Servicio Geológico Colombiano; 2001 p. 150. Disponible en: [https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=47810&shelfbrowse\\_itemnumber=78557](https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=47810&shelfbrowse_itemnumber=78557)
64. Moreno M, Tabares L, Quiroz O. Informe técnico final. Mapa hidrogeológico de Córdoba, escala 1:250.000. Proyecto Exploración y evaluación regional de las aguas subterráneas. Bogotá: INGEOMINAS –actual Servicio Geológico Colombiano; 2002.
65. Moreno M. Modelo hidrogeológico conceptual del departamento de Córdoba –Informe preliminar. Mapa hidrogeológico de Córdoba, escala 1:250.000. Exploración y evaluación de aguas subterráneas RS1\_02. Bogotá: INGEOMINAS –actual Servicio Geológico Colombiano; 2002.
66. Tabares L. Mapa hidrogeológico de Córdoba, escala 1:250.000. Consideraciones técnicas para el manejo del agua subterránea en el departamento de Córdoba. Bogotá: INGEOMINAS –actual Servicio Geológico Colombiano; 2003.
67. Martínez A. Subsistencia y geomorfología de la depresión inundable del río Magdalena. Rev CIAF. 1981;6(1-3):319-28.
68. Aslan A, Autin WJ, Blum MD. Causes of river avulsion: Insights from the Late Holocene avulsion history of the Mississippi River, U.S.A. J Sediment Res. 1 de julio de 2005;75(4):650-64.
69. Stouthamer E, Cohen KM, Gouw MJP. Avulsion and its implications for fluvial-deltaic architecture: Insights from the Holocene Rhine–Meuse Delta. En: From River to Rock Record: The preservation of fluvial sediments and their subsequent interpretation [Internet]. Society for Sedimentary Geology -SEPM (Special Publication 97); 2011. p. 215-32. Disponible en: <https://pubs.geoscienceworld.org/books/book/1194/chapter/10588902>
70. Ochoa A, García G, Martínez E, Leixon A, Paula R, Oviedo J. Geología de la plancha 53 - Magangué a escala 1:100.000 departamentos de Bolívar y Sucre / Servicio Geológico Colombiano (sgc). Bogotá, Colombia: Servicio Geológico Colombiano (sgc); 2016. 60 p.
71. Abdalla F, Moubark K, Abdelkareem M. Groundwater potential mapping using GIS, linear weighted combination techniques and geochemical processes identification, west of the Qena area, Upper Egypt. J Taibah Univ Sci. 1 de enero de 2020;14(1):1350-62.
72. Ghofur MN, Udin W, Mansor HE, Khan MM. Mapping of groundwater potential zones in a crystalline terrain using remote sensing, GIS techniques and field observations: A case study in parts of Tanah Merah, Kelantan, Malaysia. IOP Conf Ser Earth Environ Sci. 1 de agosto de 2020;549(1):012026.
73. Elubid BA, Huang T, Peng DP, Ahmed EH, Babiker MM. Delineation of groundwater potential zones using integrated remote sensing, GIS and multi-criteria decision making (MCDM). DESALINATION WATER Treat. 2020;192:248-58.
74. Kaewdum N, Chotpantararat S. Mapping potential zones for groundwater recharge using a GIS technique in the lower Khwae Hanuman sub-basin area, Prachin Buri Province, Thailand. Front Earth Sci. 21 de septiembre de 2021;9:717313.
75. OpenTopography. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Global Version 3.0 Product release. 2013; Disponible en: <https://opentopography.org/meta/OT.042013.4326.1>
76. Food and Agriculture Organization - FAO. Guía para la descripción de suelos. Cuarta edición [Internet]. Roma; 2009. Disponible en: <https://www.fao.org/3/a0541s/a0541s.pdf>

77. Ahmed TH, Al-Manmi DAM. Delineation of groundwater productivity zones with the integration of GIS and remote sensing methods, Bazian Basin, Sulaymaniyah, Kurdistan Region, Iraq. *J Basrah Res Sci.* 2019;45(2):289-309.
78. Maity PK, Shit PK. Spatial appraisals of groundwater recharge potential zone identification using remote sensing and GIS. En: Bhunia GS, editor. *Groundwater and Society* [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2021. p. 407-27. Disponible en: [https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-64136-8\\_19](https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-64136-8_19)
79. Magesh N, Chandrasekar N, Soundranayagam J. Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS and MIF techniques. *Geosci Front.* marzo de 2012;3(2):189-96.
80. Fashae OA, Tijani MN, Talabi AO, Adedeji OI. Delineation of groundwater potential zones in the crystalline basement terrain of SW-Nigeria: an integrated GIS and remote sensing approach. *Appl Water Sci.* marzo de 2014;4(1):19-38.
81. Jasrotia AS, Kumar A, Singh R. Integrated remote sensing and GIS approach for delineation of groundwater potential zones using aquifer parameters in Devak and Rui watershed of Jammu and Kashmir, India. *Arab J Geosci.* abril de 2016;9(4): 304.
82. Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. Estudio general de suelos y zonificación de tierras. Departamento de Bolívar. Escala 1:100.000. Bogotá; 2004.
83. Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. Mapa digital de suelos del departamento de Córdoba. República de Colombia. Escala 1:100.000. Bogotá; 2009.
84. Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. Estudio general de suelos y zonificación de tierras. Departamento del Magdalena. Escala 1:100.000. Bogotá; 2009.
85. Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. Estudio general de suelos y zonificación de tierras. Departamento de Sucre. Escala 1:100.000. Bogotá; 1998.
86. Lentswe GB, Molwalefhe L. Delineation of potential groundwater recharge zones using analytic hierarchy process-guided GIS in the semi-arid Motloutse watershed, eastern Botswana. *J Hydrol Reg Stud.* abril de 2020;28:100674.
87. Ahmad I, Dar MA, Andualem TG, Teka AH. GIS-based multi-criteria evaluation of groundwater potential of the Beshilo River basin, Ethiopia. *J Afr Earth Sci.* abril de 2020;164:103747.
88. Horton R. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Prog Phys Geogr Earth Environ.* 1945;56:275-370.
89. Gallagher A, editor. Drainage basins. En: *Aquatic habitat assessment: common methods.* Bain M, Stevenson N, editores. Bethesda, Md: American Fisheries Society; 1999. p. 25-34.
90. Glennon A, Groves C. An examination of perennial stream drainage patterns within the Mammoth Cave watershed, Kentucky. *J Cave Karst Stud.* 2002;64:82-91.
91. Dragičević N, Karleuša B, Ožanić N. Improvement of drainage density parameter estimation within erosion potential method. En: *EWaS3 2018* [Internet]. MDPI; 2018. p. 11-620. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2504-3900/2/11/620>
92. Charlston C. Drainage Density and Streamflow: Physiographic and Hydraulic Studies of Rivers. *U S Geol Surv -USGS.* 1963;(422C):1-8.
93. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Mapa de coberturas de la tierra, metodología Corine Land Cover. Escala 1:100.000. Período 2018. 2021.
94. Doke A. Delineation of the Groundwater Potential Using Remote Sensing and GIS: A Case Study of Ulhas Basin, Maharashtra, India. *Arch Photogramm Cartogr Remote Sens.* 1 de diciembre de 2019;31(1):49-64.

95. Cronshey R. Urban hydrology for small watersheds. US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division; 1986.
96. Mahmoud S, Alazba A, Amin M. Identification of Potential Sites for Groundwater Recharge Using a GIS-Based Decision Support System in Jazan Region-Saudi Arabia. *Water Resour Manag.* agosto de 2014;28(10):3319-40.
97. Beven KJ, Kirkby MJ. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrol Sci Bull.* marzo de 1979;24(1):43-69.
98. Gessler P, Moore I, McKenzie N, Ryan P. Soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes. En: *Journal in southeastern Australia, in GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues.* M. Goodchild *et al.* GIS World Books; 1995.
99. Moore I, Gessler P, Nielsen G, Petersen G. Terrain attributes: estimation methods and scale effects. En: *Jakeman A, Beck M, McAleer M, editores. Modelling Change in Environmental Systems.* Wiley. Londres: John Wiley and Sons Ltd; 1993. p. 189-214.
100. Li X, McCarty GW, Karlen DL, Cambardella CA. Topographic metric predictions of soil redistribution and organic carbon in Iowa cropland fields. *CATENA.* enero de 2018;160:222-32.
101. Sørensen R, Zinko U, Seibert J. On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. *Hydrol Earth Syst Sci.* 15 de febrero de 2006;10(1):101-12.
102. Achu AL, Thomas J, Reghunath R. Multi-criteria decision analysis for delineation of groundwater potential zones in a tropical river basin using remote sensing, GIS and analytical hierarchy process (AHP). *Groundw Sustain Dev.* abril de 2020;10:100365.
103. Jenness J. Topographic Position Index (tpi\_jen.avx) extension for ArcView 3.x, v. 1.2 [Internet]. 2006. Disponible en: <http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm>
104. Weiss A. Topographic position and landforms analysis. En *The Nature Conservancy*; 2001. Disponible en: [http://www.jennessent.com/downloads/tpi-poster-tnc\\_18x22.pdf](http://www.jennessent.com/downloads/tpi-poster-tnc_18x22.pdf)
105. Riley SJ, DeGloria SD, Elliot R. A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. *Intermt J Sci.* 1999;5(1-4):23-7.
106. Brožová N, Baggio T, D'Agostino V, Bühler Y, Bebi P. Multiscale analysis of surface roughness for the improvement of natural hazard modelling. *Nat Hazards Earth Syst Sci.* 22 de noviembre de 2021;21(11):3539-62.
107. Mukherjee S, Mukherjee S, Garg RD, Bhardwaj A, Raju PLN. Evaluation of topographic index in relation to terrain roughness and DEM grid spacing. *J Earth Syst Sci.* junio de 2013;122(3):869-86.
108. Nair HC, Padmalal D, Joseph A, Vinod PG. Delineation of Groundwater Potential Zones in River Basins Using Geospatial Tools—an Example from Southern Western Ghats, Kerala, India. *J Geovisualization Spat Anal.* diciembre de 2017;1(1-2):5.
109. White J. Convex-concave landslopes: a geometrical study. *Ohio J Sci.* 1966;66(6):592.
110. Saaty TL. *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation.* Nueva York: McGrawHill; 1980.
111. Saaty RW. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Math Model.* 1987;9(3-5):161-76.
112. Goepel KD. Implementation of an Online Software Tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS). *Int J Anal Hierarchy Process.* 6 de diciembre de 2018;10(3):469-87.