



Imagen tomada de Pixabay.com

Capítulo 2

Potencial de deformación del paisaje neotectónico en el sistema acuífero La Mojana

Potential for Deformation of the Neotectonic Landscape in La Mojana Aquifer System

Flórez-Castaño, J. D.¹, Herrera-Arango, J.¹, Rosso-Pinto, M. J.¹,
Marrugo-Negrete, J. L.¹, Paternina-Uribe, R.¹

¹ 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 índice de deformación neotectónica del paisaje (IDNP) permite identificar los efectos de los procesos tectónicos recientes y actuales, que han contribuido a reconstruir o reordenar de manera parcial o total, el plano morfoestructural del relieve en un área. Se tuvieron en cuenta estudios previos, donde se presentan a los complejos cenagosos dentro de los límites del Sistema Acuífero La Mojana (SALM), como posibles trampas de sedimentos debido a la subsidencia diferencial con tasas de hundimiento que varían entre 1 mm/año y 4,5 mm/año. Así, el estudio tuvo como objetivo determinar con un mayor grado de certeza el impacto de la neotectónica sobre la subsidencia, el transporte de sedimentos y la recarga hidrogeológica en el SALM. Para ello, se analizaron nueve variables (dos morfoestructurales, cuatro geomorfológicas y tres geológicas) procesadas en un sistema de información geográfica (SIG), en complemento con un análisis de decisión multicriterio basado en el proceso jerárquico analítico (PJA). Para obtener el IDNP, cada variable se estandarizó utilizando el método de rupturas naturales de Jenks y se reclasificó en diez clases, representadas en diez valores. Los resultados revelan que las áreas con alta y muy alta categoría coinciden con los lineamientos estructurales, esto indica la incidencia de deformación neotectónica en el SALM. Por su parte, las roturas de los diques marginales del río Cauca, generadores de sistemas avulsivos e inundaciones en La Mojana, coinciden con un IDNP muy alto. Algunos complejos cenagosos con IDNP alto concordaron con zonas de acumulación debido a una deformación gobernada por bloques micro tectónicos. Además, se observó coincidencia entre las áreas de alto potencial de recarga hidrogeológica y alto IDNP, lo que sugiere que las deformaciones neotectónicas favorecen la recarga. El IDNP es una herramienta valiosa para la comprensión y planificación del territorio, lo cual contribuye a la gestión adecuada del recurso hidrogeológico en el SALM.

Palabras clave: índice de deformación neotectónica del paisaje, subsidencia, transporte de sedimentos, proceso jerárquico analítico, recarga hidrogeológica.

Introducción

La neotectónica estudia lo concerniente al reconocimiento de las fuerzas tectónicas desde la base del Plioceno y el Holoceno hasta los tiempos actuales (1); por lo tanto, al evaluar la deformación del paisaje se han de considerar como relevantes las geoformas que indican actividad geológica reciente o actual, tales como escarpes de fallas, facetas triangulares y trapezoidales, silletas de fallas, corrientes alineadas, basculamientos del terreno, depósitos cuaternarios confinados y superficies de rupturas, entre otras (2).

La subregión de La Mojana, perteneciente al Sistema Acuífero La Mojana, actúa como un delta interior donde confluyen los ríos Magdalena, Cauca y San Jorge (3,4). Este territorio se ha visto relacionado con subsidencia diferencial hacia los complejos cenagosos con tasas de hundimiento que varían entre 1 mm/año y 4,5 mm/año (5–8). Así se plantea que la formación de trampas naturales de sedimento en los complejos cenagosos ocurre debido al posible diseño neotectónico del paisaje.

El Sistema Acuífero La Mojana enfrenta un problema significativo de subsidencia y transporte de sedimentos, influenciado por posibles procesos neotectónicos. Esta subsidencia diferencial ha provocado la formación de trampas de sedimentos en los complejos cenagosos (5–8); este sedimento es aportado principalmente por los rompimientos del río Cauca, por lo que afecta la dinámica hidrológica y geomorfológica de la región.

El análisis multiespectral realizado con imágenes Landsat, para el período comprendido entre 1982 y 2022, reveló tres complejos cenagosos como los mayores sumideros de los sedimentos aportados por los sistemas avulsivos alimentados por los desbordamientos del río Cauca: el complejo cenagoso Ayapel, al sur; el complejo cenagoso Las Flores, al sur oeste; y el complejo cenagoso Hormiga – La Villa, en la zona centro occidental de La Mojana. También se ha indicado la existencia de microbloques

neotectónicos en la isla aluvial de Margarita, separada del SALM por el Brazo de Loba del río Magdalena (9).

En esta investigación se determinó con un mayor grado de certeza el impacto generado por la neotectónica sobre la subsidencia, el transporte de sedimentos y la recarga hidrogeológica en el Sistema Acuifero La Mojana (SALM). Este sistema está distribuido en 34 municipios pertenecientes a los departamentos de Antioquia, Bolívar, Córdoba y Sucre; y cuenta con características geológicas, geotectónicas y morfométricas que evidencian deformaciones del paisaje, como: cuerpos de agua alineados y sistemas de falla.

La deformación neotectónica del paisaje puede estudiarse a partir de las evidencias geomorfológicas, depositacionales y erosivas, causadas por actividad tectónica reciente sobre los materiales neógenos y cuaternarios (10,11), sin dejar de lado las particularidades geológicas y la calidad de la información disponible en la zona de estudio (12).

Por otro lado, el índice de deformación neotectónica del paisaje (IDNP) permite identificar los efectos de procesos tectónicos recientes y actuales, que han contribuido a reconstruir o reordenar de manera parcial o total, el plano morfoestructural del relieve en la zona de estudio (1,13).

Para obtener el IDNP del Sistema Acuífero La Mojana, se utilizó el método de Argyriou *et al.* (2016), basado en nueve variables (14): la amplitud del relieve (AR) y el índice de gradiente de la longitud de la corriente (ILC) como morfoestructurales; el gradiente de la pendiente (P), el índice de humedad topográfica (IHT), la densidad de drenaje (DD) y la frecuencia de drenaje (FD), como geomorfológicas; y la litología (LT), la densidad de lineamientos (DL) y la frecuencia de lineamientos (FL), como geológicas. La información anterior es obtenida a partir de los derivados del modelo digital de elevación y los mapas geológicos del área de estudio.

La distribución espacial del IDNP se obtuvo mediante la integración de las variables mencionadas y un análisis de decisión multicriterio (ADMC) para determinar el grado de incidencia de cada variable en las deformaciones del paisaje, y una combinación lineal ponderada para expresar la escala del índice.

Existen otras propuestas metodológicas para determinar el IDNP que incluyen variables adicionales: factor de forma (FF), relación circulatoria (RC), integral hipsométrica (IH), relación entre el ancho y la altura del piso del valle (VF) e índice de sinuosidad de la corriente (ISC) (15); sin embargo, estas propuestas metodológicas no fueron consideradas debido a que la zona de estudio se encuentra bajo el dominio de la topografía plana, así como también se observa la presencia de sistemas avulsivos definidos por el desbordamiento del río Cauca hacia nuevos canales en su llanura aluvial.

Otro método implementado en el estudio de la deformación del paisaje consistió en analizar los marcadores geomórficos y estratigráficos, considerando esto como evidencias de la respuesta del relieve a eventos neotectónicos, entre los que se cuentan la red de drenaje, el perfil de la cuenca y las zonas de incisión. Autores como Burbank y Anderson (2013) exponen que estos marcadores permiten generar u obtener información sobre la variabilidad y los patrones de los paisajes en diferentes periodos de tiempo (1). Estudios realizados en la India con esta metodología identificaron características tectonogeomórficas significativas en las cuencas del sur de este país, rotación en sentido antihorario de la placa India y cambios de dirección en la cuenca del río Thamirabarani (16).

Metodología

Área de estudio

El Sistema Acuífero La Mojana está distribuido en 34 municipios pertenecientes a los departamentos de Antioquia, Bolívar, Córdoba y Sucre, y cuenta con una extensión territorial de 12.672 km² (**Figura 2-1**).

Figura 2-1. Área de estudio en el Sistema Acuífero La Mojana



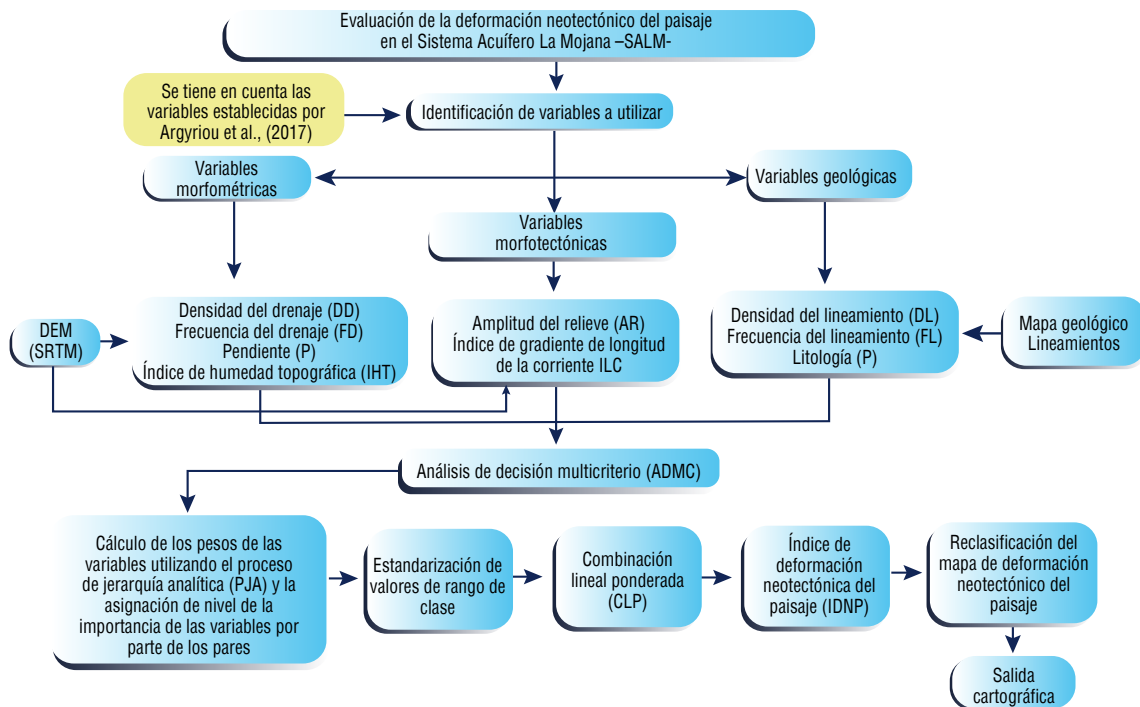
Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361.

Está limitado hacia el norte por el sistema de fallas de Loba, hacia el occidente por el Cinturón Plegado de San Jacinto, hacia el oriente por el basamento cristalino y hacia el sur por el Bajo Cauca Antioqueño. Esta región presenta un clima tropical cálido y húmedo, con temperaturas constantes entre 28° C y 25 °C (16). La precipitación anual varía entre 1.000 mm hacia Magangué y 4.500 mm en la zona de Nechí y Achí. La topografía del área de estudio está dada por zonas de bajas pendientes y colinas medias a bajas (17). La zona con mayor altura se encuentra en el municipio de Ciénaga de Oro con 330 m s. n. m. y las menores, en las bocas del San Jorge con 6 m s. n. m.

Diseño metodológico

La identificación de deformaciones en el paisaje neotectónico del Sistema Acuífero La Mojana se desarrolló a través de lo establecido en la **Figura 2-2**

Figura 2-2. Diseño metodológico para la evaluación de la deformación del paisaje neotectónico en el Sistema Acuífero La Mojana



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

Identificación de variables

La deformación del paisaje neotectónico en el Sistema de Acuífero La Mojana fue evaluada a través del índice propuesto por Argyriou *et al.*, (2016), el cual considera como criterio de investigación un total de nueve variables (14), entre las que se encuentran: cuatro de tipo morfológicas, dos morfotectónicas y tres geológicas, correspondiendo a límites, lineamientos, fallas, litología, cuencas hidrográficas, drenajes y elevación, siendo estas replicadas por diversos autores (6,8,9).

Variables morfológicas

Entre las variables morfológicas, se encuentran las siguientes:

Densidad de drenaje (DD): define la capacidad de la roca a ser degradada; puede estar sujeta a zonas de fallas ocultas, lo que proporciona una ruta para las aguas subterráneas. Además, los pequeños lagos y ríos suelen ser abundantes a lo largo de las zonas de falla, mientras los valores bajos están asociados a poco relieve y material permeable (19). De igual manera, la agrupación, la bifurcación o el cambio de dirección de ríos o arroyos a lo largo de una zona de falla, pueden verse representados en la cartografía con una alta densidad de drenajes (20). Esta variable está definida por un valor promedio sobre una unidad de área de la cuenca, en la que convergen diversos drenajes, estimando la sumatoria total de estos (21). Para el cálculo de esta variable se utiliza la ecuación 1:

$$DD = \Sigma L/A, \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- ΣL: es la longitud total de todas las corrientes ordenadas en kilómetros (Km).
- A: es el área de la cuenca en kilómetros cuadrados (Km²).

Esta variable revela información sobre el potencial de escorrentía superficial, la pendiente de la superficie del suelo, el grado de disección del paisaje, la permeabilidad de las rocas y la resistencia a la erosión (22,23).

Frecuencia de drenaje (fd): los valores altos se asocian con altos relieves, baja capacidad de infiltración y la presencia de material impermeable en el subsuelo, mientras que valores bajos implican geología de alta permeabilidad, bajo relieve y alta capacidad de infiltración (23–25). Para el cálculo de esta variable se utiliza la fórmula de la ecuación 2:

$$FD = N/A, \quad \left| \begin{array}{l} \text{Ecuación} \\ 2 \end{array} \right.$$

Donde:

N: es el número total de segmentos de flujo.

A: es el área de la cuenca.

Índice de humedad topográfica (IHT): este índice permite interpretar la distribución y el origen de la escorrentía superficial e identificar las zonas potencialmente saturables (25). Existen varios métodos para el cálculo del parámetro de índice de humedad topográfica, a partir del modelo digital de elevación. Se realiza el cálculo mediante la ecuación 3:

$$HT = \ln ((AF + 0.001) / ((P * 1.570796/90))) + 0.001 \quad \left| \begin{array}{l} \text{Ecuación} \\ 3 \end{array} \right.$$

Donde:

P: pendiente en grados.

AF: acumulación de flujo.

Al asociar esta variable con el comportamiento de la zona, se determina que, a mayor índice de humedad topográfica, mayor humedad presentará la celda en función de su configuración topográfica, mientras que los valores bajos indican condiciones secas y cercanía a las divisiones de agua en áreas de mayor escorrentía, o donde el gradiente de la pendiente es mayor (26).

Pendiente (P): esta variable actúa como indicador de la susceptibilidad ante los movimientos en masa, manteniendo una relación proporcional entre el grado de pendiente y la susceptibilidad a la deformación del paisaje; opera en compañía de parámetros como la rugosidad y cuenca acumulada (27). Se ve representada dentro de la morfología como el ángulo existente respecto a la superficie del terreno y la horizontal (27), tal como se indica en la ecuación 4:

$$S = \sqrt{(G^2 + H^2)} \quad \left| \begin{array}{l} \text{Ecuación 4} \end{array} \right.$$

Donde:

G: gradiente de este a oeste.

H: gradiente de norte a sur.

El mapa de pendientes destaca el impacto de la actividad tectónica en la forma del paisaje. Se calcula a partir del modelo de elevación digital (MDE), mediante herramientas de superficie del software ArcGIS.

Variables morfotectónicas

Entre las variables morfotectónicas se encuentran las siguientes:

Amplitud del relieve (AR): esta variable está influenciada por la presencia de accidentes geográficos, y posee dominio sobre el gradiente de la corriente en las cuencas; por lo tanto, influye en los patrones de inundación y la cantidad de sedimento que se puede transportar (28). La distribución espacial del parámetro se interpreta como la diferencia entre los puntos de elevación máxima y mínima de la cuenca. (29,30); esto ayuda a comprender la relación entre la formación de drenaje y la superficie (29,31). El comportamiento de esta variable se interpreta a través de la ecuación 5:

$$AR = H - h \quad \Bigg| \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

H: punto más alto de la cuenca.

h: punto más bajo de la cuenca.

Índice de gradiente de longitud de la corriente (ILC): esta variable es interpretada como la potencia total de la corriente disponible en un tramo del drenaje; es una variable hidráulica que está relacionada con la capacidad de la cuenca para transportar sedimentos y erosionar su lecho. El ILC funciona como una herramienta práctica que permite evaluar las posibles relaciones entre actividad tectónica, resistencia de la roca y topografía (1,25,32). Para el cálculo de este índice se emplea la ecuación 6:

$$SL = (\Delta H / \Delta L) \times L, \quad \Bigg| \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

ΔH : aumento de altura.

ΔL : distancia horizontal correspondiente en cada caso a ΔH .

L: la longitud acumulada desde el punto de partida hasta el punto medio del intervalo.

El índice de longitud de la corriente se calcula mediante la ecuación 7:

$$ILC = SL/k \quad \Bigg| \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

SL: índice de gradiente de la longitud de la corriente.

k: gradiente graduado del río.

Al momento de interpretar el valor de la variable en la cartografía, altos valores de índice de longitud de la corriente implican cuencas con alto relieve, roca dura y levantamiento activo; mientras que los valores más bajos sugieren una posible tectónica baja y una roca más blanda (32,33).

Variables geológicas

Entre las variables geológicas se encuentran las siguientes:

Litología (LT): la litología se comporta de diversas maneras de acuerdo con el nivel de consolidación del material, a partir de agentes externos como empujes tectónicos, clima, erosión y transporte, debido a la carga aplicada, por lo que tiende a la deformación. Se tiene en cuenta que la respuesta de la litología a acciones externas será más severa en litologías menos consolidadas, mientras que las litologías consideradas “fuertes” producen una respuesta contraria (30,34). Esta información fue obtenida a través del Atlas geológico de Colombia 2015, escala 1:500,000, del Servicio Geológico Colombiano (35).

Frecuencia de lineamientos (FL): esta variable corresponde al número de lineamientos por unidad de área. Estos lineamientos se observan como estructuras definidas o controles rectilíneos de gran extensión en valles, colinas y segmentos de ríos, que pueden demarcar espacialmente como un cambio en la litología, o expresarse geomorfológicamente (36). El manejo de esta variable se realizó a partir de las herramientas de densidad del kernel del software ArcGIS, y para su interpretación se consideró que las regiones de alta densidad de lineamientos son más susceptibles a la erosión que otras (37).

Densidad de lineamientos (DL): esta variable corresponde a la sumatoria de la longitud de lineamientos por unidad de área; se encuentra asociada a la presencia de controles rectilíneos en cursos individuales de corrientes, divisorias de aguas, alineamientos de cuerpos de aguas lénticas, y cambios bruscos de dirección de tramos de corrientes presentes en el área de estudio (36). Se estima o evalúa a partir de la herramienta de densidad de lineamientos de ArcGIS que calcula la densidad de entidades lineales; al momento de interpretar los resultados de esta variable, se tiene en cuenta que las regiones con alta densidad de lineamientos son más susceptibles a eventos erosivos que otras áreas (37).

Análisis de decisión multicriterio (ADMC)

Los diferentes métodos de análisis de decisión multicriterio se encargan de identificar y seleccionar las alternativas basadas en conocimientos y experiencias de los pares, reduciendo la subjetividad de las decisiones, y optando por la solución más idónea para resolver el problema planteado. Esta investigación pretende evaluar y cartografiar el impacto de la neotectónica sobre la distribución de la subsidencia, el transporte de sedimentos y la recarga hidrogeológica en el Sistema Acuífero La Mojana (SALM). A través de la aplicación de un enfoque ADMC basado en SIG, que incluye la superposición de varios mapas temáticos, se tiene en cuenta la reclasificación de las variables por medio del método de rupturas naturales de Jenks, y la implementación de un proceso de jerarquía analítica detallado, seguido de la aplicación del método de combinación lineal ponderada.

Proceso analítico jerárquico

Para el correcto análisis de las variables, el peso de cada una se obtuvo a través de un juicio de valor, homogenizando y evaluando los parámetros a través de la matriz de comparación por pares. Esto dio como resultado un coeficiente de ponderación de los factores, utilizando para su representación, una escala de números absolutos que permite transformar aspectos cualitativos en cuantitativos, lo que facilita la comparación entre las distintas alternativas y da lugar a resultados más objetivos y fiables (38,39).

Reclasificación de las variables

Tras completar el proceso de ponderación de las variables, para la obtención de los valores de deformación del paisaje neotectónico, se realizó la reclasificación de estas variables para facilitar su interpretación. La tabla de los valores se clasificó mediante el método de rupturas naturales de Jenks —*Jenks natural breaks*— en diez clases, para, posteriormente, clasificarlos y representarlos en valores de uno a diez (13,14).

Combinación lineal ponderada

Más adelante, se multiplicaron los pesos determinados en el proceso analítico jerárquico, con el valor obtenido en la estandarización de cada variable, obteniendo como resultado el potencial de la deformación del paisaje neotectónico en el Sistema Acuífero La Mojana. El proceso matemático utilizado para calcular las prioridades es llamado síntesis; dicho proceso implica el cálculo de valores y vectores característicos. De ahí surgió, a través de la herramienta SIG, un mapa del índice de deformación neotectónico del paisaje (IDNP), después de la asignación de los valores ponderados de sus celdas, según la ecuación 8, propuesta por Argyriou *et al.*, (2016) (14):

$$IDPN = \sum FW * fr \quad \Bigg| \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

Fw: peso de cada factor.

fr: valor de rango estandarizado de cada clase de criterio.

El mapa resultante tiene el mismo rango de valores que los mapas de criterios estandarizados utilizados, y al momento de su interpretación, se considera que los valores más altos del índice corresponden a áreas altamente deformadas o sobre todo susceptibles a la deformación neotectónica.

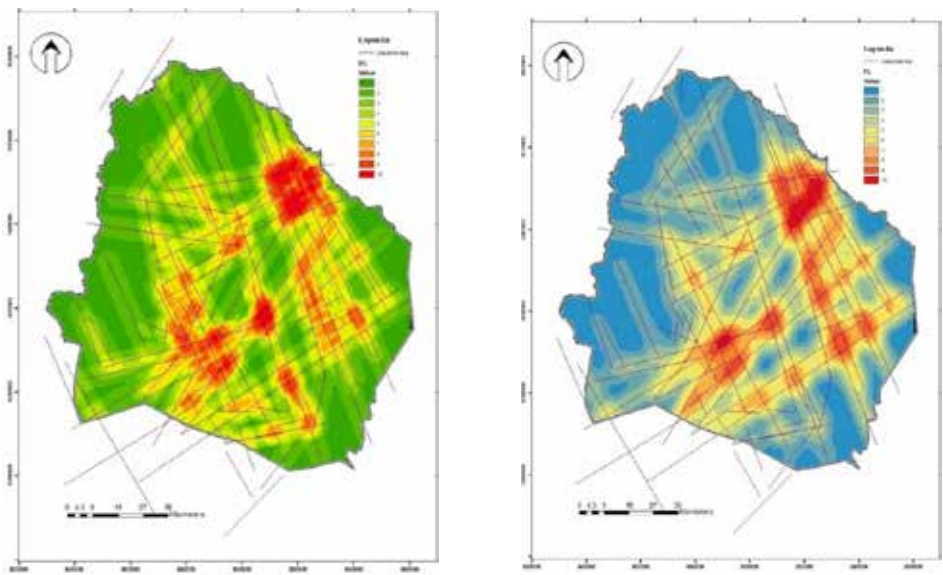
Los valores del IDNP obtenidos sobre el área de estudio se clasificaron con el método de rupturas naturales de Jenks y se obtuvieron cinco clases: muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto (40). Por último, a través del software ArcGIS, se generó la salida gráfica, que mostró como resultado el potencial de deformación neotectónico del Sistema Acuífero La Mojana.

Resultados y discusión

Al interpretar los resultados obtenidos en la evaluación del IDNP en el Sistema Acuífero La Mojana, se observa que las zonas están representadas con valores de uno a diez, donde uno indica zonas con muy baja deformación del paisaje neotectónico y diez, zonas con muy alta deformación. La variabilidad espacial de este índice está determinada por el comportamiento de las diversas variables dentro de la zona de estudio.

En el caso de la densidad de lineamientos, los valores más altos se asocian a la presencia de sistemas de fallas como el sistema de Sucre, sistema de Loba, falla de San Benito y falla del San Jorge. Mientras que, en el sector septentrional del SALM, hacia la confluencia de los ríos San Jorge y Magdalena, se presentan los valores más altos debido a la intersección de las fallas de Loba y San Jorge (**Figura 2 - 3**).

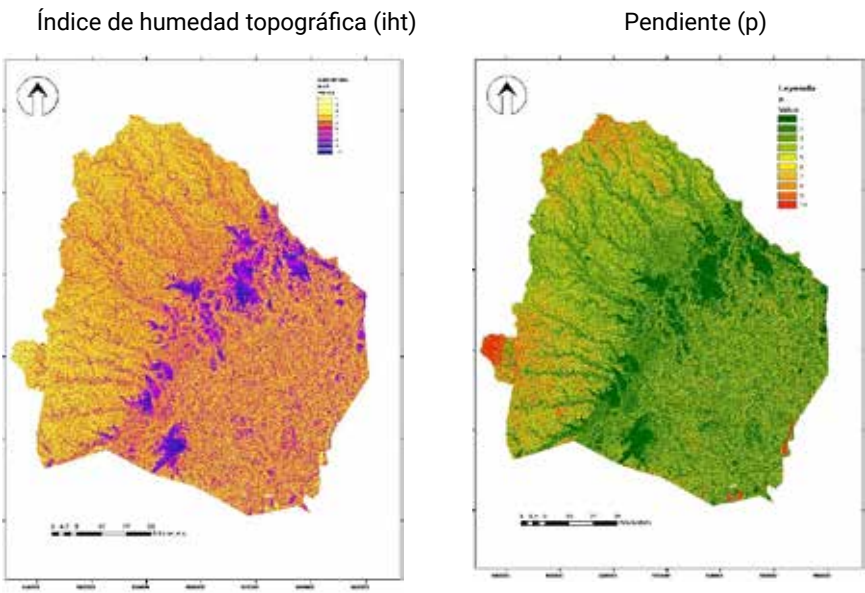
Figura 2-3. Mapas de distribución espacial de los criterios utilizados en la metodología ADMC basada en SIG: DL y FL



Fuente: Construcción equipo de trabajo a partir de imágenes del RSTM– Proyecto Código BPIN: 2020000100361.

El índice de humedad topográfica expresa la distribución espacial del suelo y la saturación de la superficie con respecto a la influencia de la topografía; por lo tanto, para su interpretación, se considera que este índice está relacionado con las pendientes, por lo que representa la acumulación de flujo al pie de zonas con altas pendientes y zonas con mayor rugosidad. Las zonas con un valor de IHT entre seis y diez coinciden con áreas propensas a la saturación de humedad, esto se refleja en el mapa a través de una concentración en la zona central, también se identifican cuerpos de agua al oeste, y algunos fragmentos hacia el sureste del Sistema Acuífero La Mojana, como los depósitos y los abanicos aluviales (Figura 2 - 4). Mientras que las zonas con valores menores a seis en la clasificación corresponden a superficies de mayor relieve, con poca acumulación de humedad y crestas longitudinales.

Figura 2-4. Mapas de distribución espacial de los criterios utilizados en la metodología ADMC basada en SIG: IHT y P.



Fuente: Construcción equipo de trabajo a partir de imágenes del RSTM– Proyecto Código BPIN: 2020000100361.

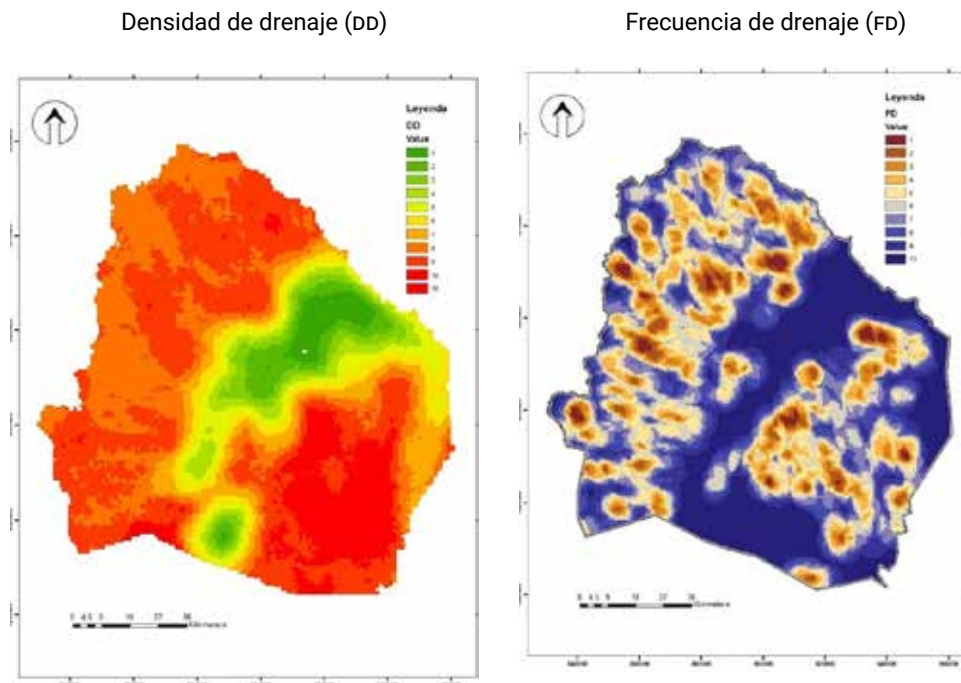
En cuanto a la pendiente, los valores oscilan desde 0° hasta 45°; la distribución espacial de este criterio se ve representada en el mapa de la **Figura 2-4**. Se logra identificar que la mayor parte del área de estudio se caracteriza por pendientes con categorías de baja a media, presentando un valor de cero a seis con pendientes de 0° a 9,3°, sumado a la presencia de algunas zonas de importancia neotectónica. Por otro lado, las pendientes con una categoría de muy bajas, con valoración de uno a dos, con pendientes de 0° a 2,5°, se asocian con la presencia de drenajes y zonas cenagosas del Sistema Acuífero La Mojana; mientras que las pendientes más altas, con valores superiores a seis, con pendientes entre 9,3° hasta 45°, se encuentran en la parte norte y oeste del área de estudio, donde se logran identificar los paisajes montañosos de las formaciones de Ciénaga de Oro y El Carmen.

La distribución espacial de los parámetros, densidad de drenajes y frecuencia de drenajes se ve representada en la **Figura 2-5**. Se aprecia que los valores más bajos coinciden con cuerpos de agua ubicados en los municipios de Magangué, San Benito Abad, Caimito, Sucre, Ayapel y San Marcos, los cuales se encuentran distribuidos en la parte norte y sureste del área de estudio.

Los valores más altos se concentran en la parte sureste del Sistema Acuífero La Mojana, donde se ubica el cinturón de avulsión en los municipios de Sucre, Achí, Majagual, Guaranda y sur de San Benito Abad, hasta llegar a los depósitos y abanicos aluviales en los municipios de Magangué, San Marcos, Caimito, y algunos sectores de San Jacinto del Cauca; estos depósitos aluviales se extienden desde el centro hasta el noreste del Sistema Acuífero La Mojana.

Al interpretar el comportamiento de los drenajes, se observa un foco de baja densidad de drenaje en el lineamiento del San Jorge direccionado hacia el suroeste, pasando por los municipios de Ayapel, San Marcos, Caimito, San Benito Abad y Magangué. Este foco se vuelve más notorio en la cartografía de frecuencia de drenaje, al igual que el lineamiento de Sucre que se muestra en el sur del área de estudio. Se halla una evidente coincidencia espacial entre zonas con altos valores de densidad de lineamiento y frecuencia de lineamientos, con zonas que presentan un alto valor de densidad de drenaje y frecuencia de drenaje.

Figura 2-5. Mapas de distribución espacial de los criterios utilizados en la metodología ADMC basada en SIG: DD y FD.



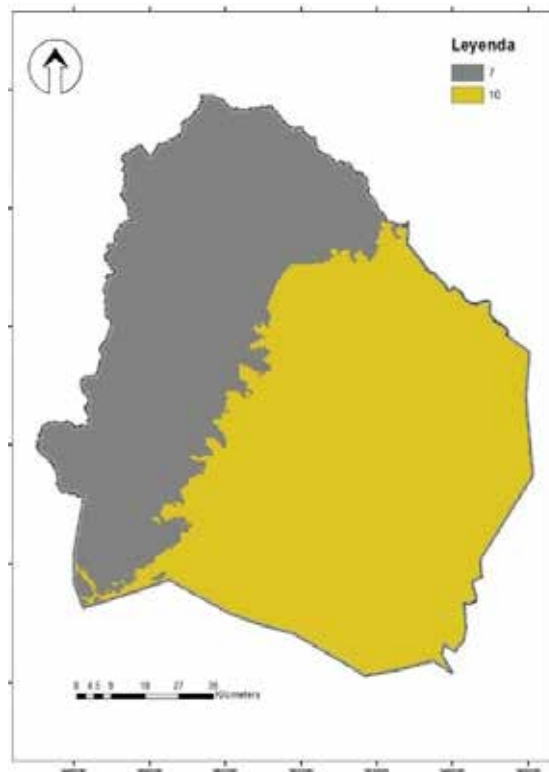
La variable LT mostró solamente dos tipos de comportamiento. Se define por sus características y condiciones en torno a la deformación del paisaje, reclasificando las categorías en dos grupos.

En el primer grupo se encuentran los depósitos paludales, el cinturón de avulsión, los cuerpos de agua y los depósitos aluviales, representados con un color gris, como lo muestra la **Figura 2-6**. A este primer grupo se le asignó una valoración de diez —la más alta—, y se encontraron zonas con alta probabilidad de deformación neotectónica debido a la presencia de materiales poco consolidados.

En el segundo grupo se encuentran las formaciones Ciénaga de Oro, El Carmen, Cerrito, Sincelejo y Betulia, representadas con un color amarillo, como lo muestra la **Figura 2-6**, definido en una valoración de siete. Para la interpretación del comportamiento neotectónico de este grupo se tiene en cuenta que, comparativamente, tiene una menor probabilidad de deformación debido a que se tiene un material semiconsolidado.

Figura 2-6, Mapas de distribución espacial de los criterios utilizados en la metodología ADMC basada en SIG: LT.

Litología -LT-



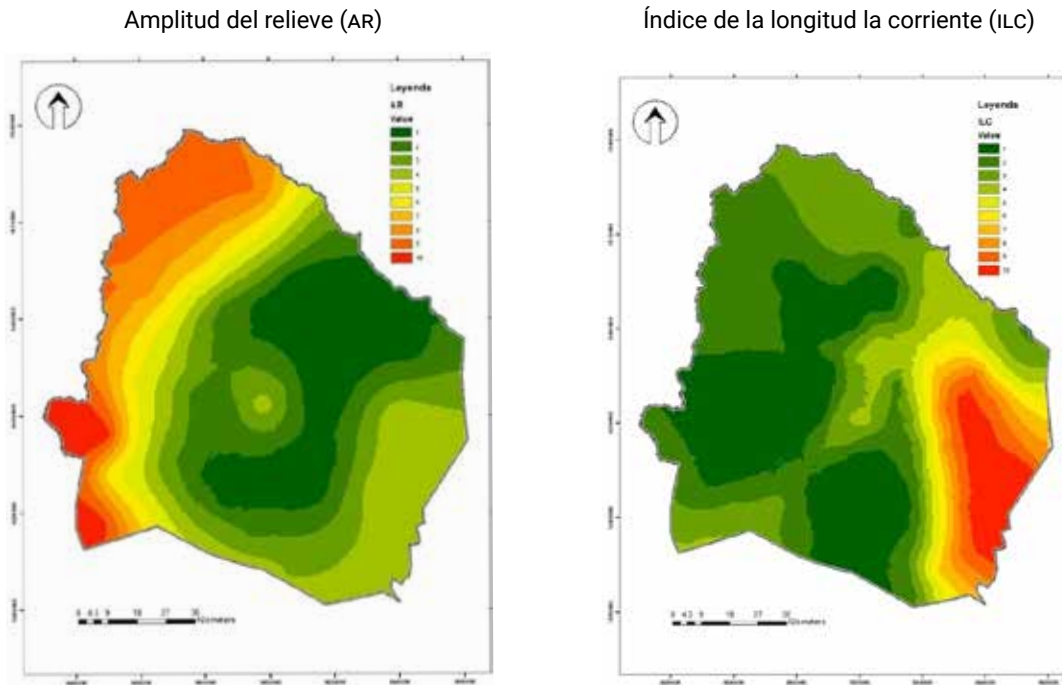
Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361, a partir de Atlas geológico de Colombia 2015, escala 1:500,000. Servicio Geológico Colombiano, 26 planchas. Bogotá.

La AR presenta un comportamiento variado en el área; por un lado, los valores más altos están localizados hacia el norte y oeste de la zona de estudio donde se encuentran los paisajes montañosos de la Serranía de San Jacinto —Montes de María— y las formaciones Ciénaga de Oro y El Carmen. Por otro lado, se encuentran zonas con una categoría que varía de baja a muy baja hacia el sur y el este del Sistema de Acuífero La Mojana. En esta zona también se ubica el cinturón de avulsión, los depósitos aluviales y los cuerpos de agua —geofomas o estructuras características de zonas de baja pendiente— (**Figura 2-7**).

Mientras que, en la cartografía representativa del índice de longitud de la corriente, se identifican valores altos hacia el sureste del área de estudio, donde se encuentra también el sistema de fallas de Loba direccionado hacia el noreste. Estos lineamientos definen cursos individuales de corrientes; de otro lado,

se identifica también la visible influencia de la falla del San Jorge con valores moderados, direccionados desde el sureste hacia el noreste, evidenciando el control rectilíneo de la llanura aluvial del San Jorge (Figura 2-7).

Figura 2-7. Mapas de distribución espacial de los criterios utilizados en la metodología ADMC basada en SIG: AR y ILC



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

Proceso de jerarquía analítica

Inicialmente fueron realizadas las comparaciones por pares para cada uno de los factores establecidos por Wind y Saaty (1980), sumando los valores de cada columna (38) (Tabla 2-1).

Tabla 2-1. Asignación de pesos para los factores en la escala de 1 a 5

	DL	FL	IHT	P	LT	DD	FD	AR	ILC
DL	1,00	1,00	2,00	2,00	2,00	3,00	3,00	4,00	5,00
FL	1,00	1,00	2,00	2,00	2,00	3,00	3,00	4,00	5,00
IHT	0,50	0,50	1,00	2,00	2,00	3,00	3,00	4,00	5,00
P	0,50	0,50	0,50	1,00	2,00	3,00	3,00	4,00	5,00
LT	0,50	0,50	0,50	0,50	1,00	2,00	2,00	3,00	4,00
DD	0,50	0,33	0,33	0,33	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00
FD	0,50	0,33	0,33	0,33	0,50	0,50	1,00	3,00	4,00
AR	0,33	0,25	0,25	0,25	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00
ILC	1,00	0,20	0,20	0,20	0,25	0,25	0,25	1,00	1,00
Sumatoria	5,83	4,62	7,12	8,62	10,58	16,08	17,58	27,00	34,00

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

Posteriormente, se normalizaron los factores presentes en la Tabla 2-1, dividiendo el nivel de importancia otorgado por los evaluadores entre la sumatoria de cada columna. Como se muestra en la Tabla 2-2, este

valor corresponde al peso que se le asigna a cada factor, considerando que, al ser estandarizado, la suma de los promedios debe ser igual a uno.

Tabla 2-2. Normalización y promedio de los pesos de los factores

	DL	FL	IHT	P	LT	DD	FD	AR	ILC	Sumatoria
DL	0,17	0,22	0,28	0,23	0,19	0,19	0,17	0,15	0,15	1,74
FL	0,17	0,22	0,28	0,23	0,19	0,19	0,17	0,15	0,15	1,74
IHT	0,09	0,11	0,14	0,23	0,19	0,19	0,17	0,15	0,15	1,41
P	0,09	0,11	0,07	0,12	0,19	0,19	0,17	0,15	0,15	1,22
LT	0,09	0,11	0,07	0,06	0,09	0,12	0,11	0,11	0,12	0,88
DD	0,09	0,07	0,05	0,04	0,05	0,06	0,11	0,11	0,12	0,70
FD	0,09	0,07	0,05	0,04	0,05	0,03	0,06	0,11	0,12	0,61
AR	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,04	0,03	0,31
ILC	0,17	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,04	0,03	0,39
Sumatoria	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	9,00

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

Tabla 2-3. Pesos de las variables para evaluar la neotectónica en el Sistema Acuífero La Mojana

Variables	Peso	%
DL	0,194	19,4
FL	0,194	19,4
IHT	0,156	15,6
P	0,136	13,6
LT	0,098	9,8
DD	0,077	7,7
FD	0,067	6,7
AR	0,035	3,5
ILC	0,043	4,3
Sumatoria	1,000	100,00

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

Para la interpretación de los pesos obtenidos a partir del criterio de los expertos en el proceso de jerarquía analítica, que representa el grado de incidencia o peso de cada variable sobre la ocurrencia de la deformación del paisaje, destacan las variables densidad de lineamiento y frecuencia de lineamientos con un peso de 19,4 % cada una; luego, el índice de humedad topográfica, la pendiente y la litología con 15,6 %, 13,6 % y 9,8 %, respectivamente; siguiendo, 7,7 % para densidad de drenaje y 6,7 % para frecuencia de drenaje, y por último, las variables con menor peso para los evaluadores fueron la amplitud del relieve y el índice de longitud de la corriente con 3,5 % y 4,3 %, respectivamente (**Tabla 2 - 3**).

En la etapa final, los juicios de los pares o expertos se consideran coherentes siempre que la ratio de consistencia (RC) sea menor a 0,1. Tolerados si $0,1 < RC < 0,2$ y rechazados si $RC > 0,2$ (41). Para esta investigación, el RC tuvo un valor de 0,015, por lo que dichos juicios fueron aceptados como consistentes.

Estandarización de las variables

La **Tabla 2 - 4** muestra la reclasificación por ruptura natural de Jenks, de las variables utilizadas para la determinación del potencial de deformación neotectónico del paisaje en el Sistema Acuífero La Mojana.

Cada variable toma valores de uno a diez, donde uno representa las condiciones que no favorecen y diez las condiciones que más favorecen al fenómeno.

Tabla 2-4. Tabla de reclasificación de los factores

Variable	Rango de valores		Reclasificación	Variable	Rango de valores		Reclasificación
DL	0,00	7,01	1	LT	GRUPO 1		10
	7,01	17,17	2		GRUPO 2		7
	17,17	25,23	3	DD	0,04	0,31	10
	25,23	32,59	4		0,31	0,55	9
	32,59	39,60	5		0,55	0,80	8
	39,60	46,26	6		0,80	1,05	7
	46,26	53,27	7		1,05	1,28	6
	53,27	61,33	8		1,28	1,54	5
	61,33	71,14	9		1,54	1,78	4
	71,14	89,36	10		1,78	1,95	3
FL	0,00	388,13	1		1,95	2,10	2
	388,13	921,80	2		2,10	2,44	1
	921,80	1455,47	3	FD	0,00	9,69	10
	1455,47	1989,14	4		9,69	25,45	9
	1989,14	2547,07	5		25,45	38,78	8
	2547,07	3105,00	6		38,78	50,90	7
	3105,00	3687,19	7		50,90	61,80	6
	3687,19	4317,90	8		61,80	72,10	5
	4317,90	5118,41	9		72,10	83,01	4
	5118,41	6185,75	10		83,01	95,13	3
IHT	3,42	6,57	10		95,13	112,70	2
	6,57	7,59	9		112,70	154,50	1
	7,59	8,96	8	AR	13,40	43,69	1
	8,96	10,49	7		43,69	71,66	2
	10,49	11,85	6		71,66	100,78	3
	11,85	13,13	5		100,78	129,91	4
	13,13	14,57	4		129,91	161,37	5
	14,57	16,45	3		161,37	192,83	6
	16,45	19,17	2		192,83	221,96	7
	19,17	25,13	1		221,96	247,59	8
P	0,00	0,71	1		247,59	277,88	9
	0,71	1,94	2		277,88	310,50	10
	1,94	3,36	3	ILC	42,41	97,60	1
	3,36	4,77	4		97,60	135,82	2
	4,77	6,36	5		135,82	171,90	3
	6,36	8,48	6		171,90	220,73	4
	8,48	11,66	7		220,73	286,54	5
	11,66	16,08	8		286,54	354,47	6
	16,08	22,97	9		354,47	418,15	7
	22,97	45,05	10		418,15	475,47	8
			475,47		526,42	9	
			526,42		583,73	10	

Combinación lineal ponderada

Para calcular el INDP se tuvieron en cuenta los pesos obtenidos en el proceso de jerarquía analítica plasados en la **Tabla 2 - 3** y la estandarización de los factores establecidos en la **Tabla 2 - 4**; se empleó la siguiente formula:

$$IDPN = (DL * 0,194) + (FL * 0,194)(IHT * 0,156) + (P * 0,136) + (LT * 0,098) + (DD * 0,077) \\ + (FD * 0,067) + (AR * 0,035) + (ILC * 0,043)$$

Ecuación 9

Esta fórmula se trabajó a través de herramientas propias del software ArcGIS. El resultado fue el potencial de deformación del paisaje neotectónico en el Sistema Acuífero La Mojana.

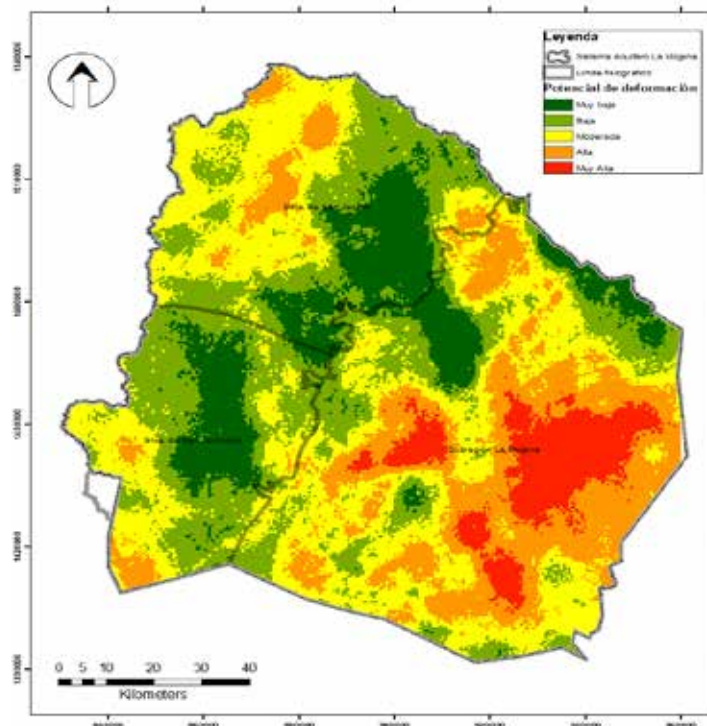
Potencial de deformación del paisaje neotectónico en el Sistema Acuífero La Mojana

A través de la combinación lineal ponderada se obtuvo como resultado un mapa final de la posible deformación el paisaje (**Figura 2-8**), el cual se reclasificó distribuyendo las rupturas naturales de Jenks en cinco clases, de muy baja a muy alta.

Se dividió el área de estudio teniendo en cuenta los límites fisiográficos. Hacia el suroriente, la subregión de la serranía de San Jerónimo; al norte, la subregión de la serranía de San Jacinto, y finalmente, al oriente de la falla del San Jorge, la subregión de La Mojana (**Figura 2-8**).

Las subregiones de San Jacinto y San Jerónimo muestran lugares de interés hacia el norte de la primera y, al suroccidente hacia el municipio de Ciénaga de Oro, con valoraciones de moderada a alta. Gran parte del área se encuentra dominada por una valoración de baja a muy baja, distribuidas en las zonas céntricas, dirigiéndose hacia el nororiente y hacia el occidente del área de estudio.

Figura 2.8. Potencial de deformación del paisaje neotectónico en el Sistema Acuífero La Mojana



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

Los resultados arrojan un mayor potencial de deformación hacia la subregión de La Mojana, dominada por valoraciones de moderado a alto hacia el centro oriente, específicamente en los cuerpos de agua, y hacia el oriente, donde se concentran focos de gran magnitud en el cinturón de avulsión con valoraciones de alta a muy alta INDP; hacia el suroccidente del área de estudio se encontró una valoración de bajo a muy bajo.

Los resultados obtenidos en la evaluación del potencial de deformación neotectónico del paisaje apuntan hacia la subregión de La Mojana, en esta zona se concentran los mayores focos con alto potencial de deformación neotectónica; así mismo, las zonas demarcadas con un alto valor coinciden con un elevado índice de longitud de la corriente, donde se destaca una relación proporcional. Esto se observa en el sistema de fallas de Sucre, en el cual se encuentra un mayor nivel de saturación del suelo con respecto a la topografía indicada por el ITHL.

Sumado a esto, las zonas categorizadas con un bajo INDP, ubicadas hacia el norte y el oeste, presentan un valor de índice de longitud de la corriente de moderado a bajo. No obstante, no todas las zonas en las que se encuentran cuerpos de agua, corresponden a un alto potencial de deformación; en la zona central del área de estudio se identifican cuerpos de agua que mantienen una categoría de alta a muy alta.

La influencia de la pendiente en estas zonas también es relevante, ya que en municipios donde se encuentran colinas medias a bajas, como Ciénaga de Oro, la serranía de San Jacinto —Montes de María— y por último, hacia el sur, la serranía de San Jerónimo, coinciden con un índice de deformación moderada y algunos focos en alto. Esto indica la influencia de zonas con altas pendientes en posibles deformaciones neotectónicas hacia el norte de la subregión San Jacinto y oeste en la subregión de San Jerónimo.

Las zonas representadas por una categoría de deformación neotectónica baja a muy baja, exponen la influencia generada por los abanicos y los depósitos aluviales, esto, debido a la naturaleza poco consolidada del material, lo que contrasta con lo encontrado hacia el cinturón de avulsión, que se destaca por coincidir con zonas que poseen un mayor índice de deformación; esto se interpreta como la tendencia de ciertos tipos de litología a favorecer posibles eventos tectónicos activos. Finalmente, se observan valores de INDP bajo en las zonas caracterizadas con una densidad de drenaje y frecuencia de drenaje baja; estas zonas coinciden geográficamente con zonas de baja pendiente, ubicadas en la falda de las serranías de San Jerónimo y San Jacinto.

Conclusiones

El índice de deformación neotectónica del paisaje para el Sistema Acuífero La Mojana se obtuvo a partir de la distribución espacial de nueve variables de carácter morfométrico, morfotectónico y geológico, integradas mediante un análisis de decisión multicriterio; para la obtención se utilizaron procesos de jerarquía analítica y una combinación lineal ponderada, implementada en un sistema de información geográfica. Los resultados más relevantes se exponen a continuación:

Las categorías alta y muy alta del INDP coinciden con las áreas donde se intersecan los lineamientos estructurales, lo que se constituye en la condición de mayor incidencia en la deformación neotectónica del SALM.

Las roturas de los diques marginales del río Cauca, que dan lugar a los sistemas avulsivos, a través de los cuales se producen las extensas inundaciones de la subregión de La Mojana, coinciden con áreas con muy alto INDP. Se interpreta como la influencia de la deformación neotectónica del paisaje en la formación de estos sistemas en el SALM. Esta concordancia debe considerarse durante el diseño de las acciones que buscan prevenir las inundaciones recurrentes y altamente perjudiciales.

Los INDP muy altos, observados parcialmente en los complejos cenagosos de Las Flores, La Hormiga – La Villa y Ayapel, parecen explicar adecuadamente la condición de estos tres complejos como sumideros de los sedimentos y los contaminantes transportados por los sistemas avulsivos, identificados mediante análisis multiespectrales y multitemporales (véase el capítulo Análisis multitemporal del comportamiento de las áreas húmedas y las plumas de sedimentos de la subregión La Mojana entre los años 1982-2022), así como la subsidencia diferencial en la subregión de La Mojana reportada por Martínez (1981), van der Hammen (1986), Plazas *et al.* (1988), Smith (1986) y Herrera *et al.* (2001) (5–9).

El comportamiento como sedimentadores naturales de los complejos cenagosos mencionados, se interpreta en esta investigación como evidencia de una deformación rígida por bloques microtectónicos que generan embalses secuenciales. Esta conclusión es concordante con los microbloques delimitados por fallas reportados por Herrera *et al.*, (2001) al norte de la subregión de La Mojana (9).

El bajo INDP asociado con los abanicos aluviales del flanco oriental de las serranías de San Jerónimo y San Jacinto, se considera producto del ocultamiento de las evidencias de deformación por parte de estos depósitos recientes.

Se encontró una gran coincidencia entre las zonas con alto potencial de recarga hidrogeológica (véase capítulo Identificación de las zonas potenciales de recarga hidrogeológica mediante procesos de análisis jerárquicos) y las áreas con alto a muy alto INDP; lo anterior sugiere que la recarga del SALM puede verse favorecida por las deformaciones neotectónicas.

El índice de deformación neotectónica del paisaje es una herramienta útil para el conocimiento y la planificación adecuada del territorio. A través de los resultados obtenidos en este capítulo, se ha alcanzado un mayor grado de comprensión de los procesos que dominan el SALM, lo que, sin duda, contribuirá a promover acciones encaminadas a la buena 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. Burbank DW, Anderson RS. Tectonic Geomorphology, Second Edition. Environ Eng Geosci. 2013;19(2):198-200.
2. INGEOMINAS. Informe No. 1-3, Investigaciones neotectónicas en el centro occidente colombiano [Internet]. 2002 [citado 2023 oct 10]. Disponible en: <https://recordcenter.sgc.gov.co/B7/21003002515005/documento/pdf/2105150051103000.pdf>
3. Humboldt A, Bondpland A. Personal narrative of travels to the equinoctial regions of America during the years 1799-1804. Vol. 3. 1851.
4. Reclus E. The Earth and its inhabitants. South America. Vol. 1. The Andes regions [Internet]. 1894 [citado 2023 oct 10]. Disponible en: <https://archive.org/details/earthitsinhabita941recl/page/n8/mode/1up?view=theater>
5. Martínez A. Subsistencia y geomorfología de la depresión inundable del río Magdalena. 1981:319-28.
6. Van Der Hammen T. Fluctuaciones holocénicas del nivel de inundaciones en la cuenca del bajo Magdalena, Cauca-San Jorge (Colombia). 1986.
7. Smith DG. Anastomosing river deposits, sedimentation rates and basin subsidence, Magdalena River, northwestern Colombia, South America. Sediment Geol. 1986;46(3-4):177-96.
8. Plazas C, Van Der Hammen T, Falchetti A, Botero P. Cambios ambientales y desarrollo cultural en el bajo río San Jorge. 1988.
9. Herrera L, Sarmiento G, Romero F, Botero P, Berrío J. Evolución ambiental de la depresión momposina (Colombia) desde el Pleistoceno Tardío a los paisajes actuales. Geol Colomb. 2001;(26).

10. Doornkamp JC. Geomorphological approaches to the study of neotectonics. *J Geol Soc.* 1986;143(2):335-42.
11. Martínez Gallego J, Goy JL, Zazo C. Un modelo de mapa neotectónico en la región Nor-oriental de la provincia de Valencia (España). *Estud Geol.* 1987;43(1-2):57-65.
12. Audemard M. Paleoseismology in Venezuela: Objectives, methods, applications, limitations, and perspectives. *Tectonophysics.* 2005;408(1-4):29-61.
13. Valkanou K, Karymbalis E, Papanastassiou D, Soldati M, Chalkias C, Gaki-Papanastassiou K. Assessment of neotectonic landscape deformation in Evia Island, Greece, using GIS-based multi-criteria analysis. *Int J Geoinform.* 2021;10(3):118.
14. Argyriou AV, Teeuw RM, Rust D, Sarris A. GIS multi-criteria decision analysis for assessment and mapping of neotectonic landscape deformation: A case study from Crete. *Geomorphology.* 2016;253:262-74.
15. Agrawal N, Gupta L, Dixit J. Geospatial assessment of active tectonics using SRTM DEM-based morphometric approach for Meghalaya, India. *All Earth.* 2022;34(1):39-54.
16. Ramkumar M, Santosh M, Rahaman SMA, Balasundareshwaran A, Balasubramani K, Mathew MJ, *et al.* Tectono-morphological evolution of the Cauvery, Vaigai, and Thamirabarani River basins: Implications on timing, stratigraphic markers, relative roles of intrinsic and extrinsic factors, and transience of Southern Indian landscape. *Geol J.* 2019;54(5):2870-911.
17. IDEAM. Condiciones hidrometeorológicas actuales de La Mojana [Internet]. 2019 [citado 2023 oct 10]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/10182/79335997/comunicado+la+mojana/886010a7-3088-4b79-a9a0-564ead67f8e8>
18. Al-Attar ZT, Othman AA, Al-Hakari SHS, Obaid AK, Salar SG, Liesenberg V. A neotectonic statistical assessment through watershed geomorphic analysis: A case study in the Greater Zab River Basin, Turkey–Iraq. *Environ Earth Sci.* 2022;81(13):355.
19. Strahler AN. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Trans Am Geophys Union.* 1957;38(6):913-20.
20. Han Z, Wu L, Ran Y, Ye Y. The concealed active tectonics and their characteristics as revealed by drainage density in the North China plain. *J Asian Earth Sci.* 2003;21(9):989-98.
21. Jianjun H, Mukang H, Ollier CD. A morphometric method to determine neotectonic activity of the Weihe basin in northwestern China. *Episodes.* 1997;20(2):95-9.
22. Devi RKM, Bhakuni SS, Bora PK. Tectonic implication of drainage set-up in the Sub-Himalaya: A case study of Papumpare district, Arunachal Himalaya, India. *Geomorphology.* 2011;127(1-2):14-31.
23. Horton R. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. 1945;56:275-370.
24. Parveen R, Kumar U, Singh VK. Geomorphometric characterization of Upper South Koel Basin, Jharkhand: A remote sensing & GIS approach. *J Water Resource and Protection (JWARP).* 2012;4(12):1042-50.
25. Troiani F, Galve JP, Piacentini D, Della Seta M, Guerrero J. Spatial analysis of stream length-gradient (SL) index for detecting hillslope processes: A case of the Gállego River headwaters (Central Pyrenees, Spain). *Geomorphology.* 2014;214:183-97.
26. Pei T, Qin CZ, Zhu AX, Yang L, Luo M, Li B, *et al.* Mapping soil organic matter using the topographic wetness index: A comparative study based on different flow-direction algorithms and kriging methods. *Ecological Indicators.* 2010;10(3):610-9.

27. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa, Escala 1:100,000 [Internet]. 2013 [citado 2023 oct 10]. Disponible en: https://recordcenter.sgc.gov.co/B22/AmeMM031_Campo_de_la_Cruz/Documento/Pdf/Anexo_B.pdf
28. Hadley R, Schumm S. Sediment sources and drainage basin characteristics in upper Cheyenne River Basin. 1961;1531-B(1531-B):198.
29. Ciccacci S, De Rita D, Freddy P. Geomorfologia quantitativa e morfotettonica dell'area di Morlupo-Castelnuovo di Porto nei Monti Sabatini (Lazio). *Supplementi di Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*. 1998;1:197-206.
30. Glock WS. Available relief as a factor of control in the profile of a land form. *J Geol*. 1932;40(1):74-83.
31. Mesa LM. Morphometric analysis of a subtropical Andean basin (Tucumán, Argentina). *Environ Geol*. 2006;50(8):1235-42.
32. Hack J. Stream-profile analysis and stream-gradient index. *J Res US Geol Surv*. 1973;1(4):421-9.
33. Seeber L, Gornitz V. River profiles along the Himalayan arc as indicators of active tectonics. *Tectonophysics*. 1983;92(4):335-67.
34. Marinos P, Hoek E. GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. En: *ISRM-IS-2000-035; 2000*.
35. Gómez J, Montes N, Nivia A, Diederix H. *Mapa geológico de Colombia 2015*. Escala 1:1,000,000. Servicio Geológico Colombiano (sgc); 2015.
36. Ramli MF, Yusof N, Yusoff MK, Juahir H, Shafri HZM. Lineament mapping and its application in landslide hazard assessment: A review. *Bull Eng Geol Environ*. 2010;69(2):215-33.
37. Taesiri V, Pourkermani M, Sorbi A, Almasian M, Arian M. Morphotectonics of Alborz Province (Iran): A case study using GIS method. *Geotecton*. 2020;54(5):691-704.
38. Wind Y, Saaty TL. Marketing applications of the Analytic Hierarchy Process. *Manag Sci*. 1980;26(7):641-58.
39. Chalkias C. *Geographical analysis with the use of geoinformatics*. 2020 [citado 2023 oct 10]. Disponible en: <https://repository.kallipos.gr/handle/11419/4546>
40. Ayalew L, Yamagishi H, Ugawa N. Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan. *Landslides*. 2004;1(1):73-81.
41. Chu P, Liu JKH. Note on consistency ratio. *Math Comput Model*. 2002;35(9-10):1077-80.