

## Zonificación de áreas susceptibles a procesos de ladera e inundaciones a partir de un análisis morfométrico en Acapulco, Guerrero

### *Zoning of areas susceptible to landslides and flooding based on a morphometric analysis in Acapulco, Guerrero*

Ana Rosa Rosales Tapia,\* José Juan Zamorano Orozco\*\* e Isaac Quijada Mendoza\*\*\*

Recibido: 15/10/2025. Aceptado: 21/01/2026. Publicado: 9/03/2026.

**Resumen.** Este estudio evalúa los peligros geomorfológicos en Acapulco mediante un análisis morfométrico para identificar zonas susceptibles a inundaciones y procesos de remoción en masa. Esta evaluación resulta fundamental dada la combinación de relieve abrupto e intensa presión urbana en la región. La metodología analiza el relieve procesando un modelo digital de elevación (MDE) en sistemas de información geográfica (SIG), integrando cinco variables: densidad y profundidad de la disección, energía del relieve y erosión potencial y total. Como resultado, se generó un modelo de susceptibilidad con niveles bajo, medio y alto. Se identificó una alta susceptibilidad a procesos de remoción en masa en zonas montañosas como La Angostura, Punta Diamante y Puerto Marqués. Por el contrario, las planicies costeras y áreas exlagunares próximas a Coyuca y Tres Palos presentan mayor vulnerabilidad a inundaciones. Los resultados validan la capacidad diagnóstica del modelo al mostrar una correspondencia significativa entre la zonificación de alta susceptibilidad y las áreas de mayor afectación reportadas por Copernicus tras el impacto del huracán Otis.

**Palabras clave:** morfometría, peligro geomorfológico, modelo digital de elevación (MDE), ordenamiento territorial, sistemas de Información geográfico, gestión de riesgos.

**Abstract.** This study evaluates geomorphological hazards in Acapulco, Guerrero, using morphometric analysis to identify susceptible areas to landslides and flooding. The methodology integrates five key variables derived from Digital Elevation Models within a GIS framework: dissection density and depth, relief energy, and potential and total erosion. Results categorized susceptibility into three levels, identifying high landslide risk in mountainous areas (e.g., La Angostura, Punta Diamante) and high flood risk in coastal plains near the Coyuca and Tres Palos lagoons. The model's diagnostic accuracy was qualitatively verified by the significant correlation between high-susceptibility zones and the damage reported by Copernicus EMS following Hurricane Otis. While not a substitute for detailed geotechnical studies, these morphometric methods provide an accessible, replicable, and scientifically sound tool for land-use planning and disaster risk management, essential for strengthening regional resilience.

**Keywords:** Morphometry, Geomorphological Hazard, Digital Elevation Model (DEM), Land-use Planning, Geographic Information Systems (GIS), Risk Management.

\* Instituto de Geografía, UNAM. Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, 04510, Coyoacán, Ciudad de México, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4146-9193>. Email: [anarosa@geografia.unam.mx](mailto:anarosa@geografia.unam.mx). Autora de correspondencia.

\*\* Instituto de Geografía, UNAM. Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, 04510, Coyoacán, Ciudad de México, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9575-5734>. Correo-e: [zamojj@geografia.unam.mx](mailto:zamojj@geografia.unam.mx)

\*\*\* Instituto de Geografía, UNAM. Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, 04510, Coyoacán, Ciudad de México, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1161-6091>, Correo-e: [isaacqm@geografia.unam.mx](mailto:isaacqm@geografia.unam.mx)

## INTRODUCCIÓN

Un fenómeno natural se define como cualquier manifestación del funcionamiento interno de la naturaleza y puede clasificarse en eventos regulares y extraordinarios. Entre los primeros se encuentran las lluvias estacionales y las lloviznas invernales; los segundos incluyen fenómenos más impactantes como tsunamis o lluvias torrenciales. La Tierra se halla en constante transformación y estos procesos deben entenderse como elementos activos en la configuración del paisaje, ya que fenómenos como lluvias intensas, avenidas, sismos o procesos geomorfológicos generan cambios en la superficie terrestre, sin ser necesariamente catastróficos.

Para comprender cómo estos procesos naturales derivan en desastres es fundamental definir con precisión los conceptos clave que articulan la gestión de riesgos. Desde una perspectiva teórica son definidos como:

**Susceptibilidad:** en el ámbito de las ciencias de la Tierra, predisposición de un sitio, por sus características físico-geográficas, a ser afectado por un peligro determinado. Se considera un componente intrínseco de la vulnerabilidad física y evalúa la probabilidad espacial de ocurrencia de un fenómeno (Corominas *et al.*, 2014).

**Peligro o amenaza:** posible ocurrencia de un evento físico, de carácter natural o provocado por el ser humano que puede causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como daños y pérdidas a la propiedad, la infraestructura, los medios de subsistencia, la prestación de servicios, los ecosistemas y los recursos ambientales (UNDRR, 2017). En el contexto de este estudio, los peligros principales son los procesos de ladera y las inundaciones, detonados por fenómenos hidrometeorológicos extremos.

**Vulnerabilidad:** propensión para verse afectado negativamente, y comprende una variedad de conceptos y elementos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad para afrontarlo y adaptarse (UNDRR, 2017). La vulnerabilidad es una condición preexistente y se compone de múltiples dimensiones, como la física, social, económica y ambiental. Se construye socialmente, por ejemplo, a través de la ocupación de zonas no

aptas para la vivienda o la falta de capacidad de respuesta institucional (Wisner *et al.*, 2014).

**Riesgo:** probabilidad de que se produzcan consecuencias perjudiciales o pérdidas esperadas como resultado de las interacciones entre los peligros y las condiciones de vulnerabilidad y la exposición que está determinada por las personas o bienes dañados (IPCC, 2023; UNDRR, 2017; Zúñiga Tovar, 2009). Se conceptualiza con la fórmula:

$$\text{Riesgo} = \text{Peligro} \times \text{Vulnerabilidad}$$

De este modo, el riesgo de desastre no reside únicamente en la intensidad de los fenómenos naturales, sino en la compleja interacción de estos con una sociedad vulnerable que, a menudo, ha contribuido en su construcción (Wisner *et al.*, 2014).

Este es el caso de la ciudad de Acapulco, en la costa sur del Pacífico Mexicano, en el estado de Guerrero. La ciudad se localiza en una bahía flanqueada por un macizo granítico denominado “Anfiteatro” por su morfología semicircular, caracterizado por un relieve accidentado, con barrancas profundas y laderas escarpadas, contrastando con amplias planicies de inundación en donde confluyen diversas cuencas hidrográficas. La zona de estudio se ubica entre las coordenadas 16°44'00" – 16°59'30" N y 99°44'30" - 100°05'30" W, con una altitud que va desde el nivel del mar hasta los 952 m s.n.m. y una extensión de 676.46 km<sup>2</sup> (Figura 1).

La posición geográfica de Acapulco, su litología y morfología, en interacción con fenómenos hidrometeorológicos extremos, configuran escenarios de peligro. La ciudad se encuentra aproximadamente a 60 km al noroeste de la Trinchera Mesoamericana, región sismo-generadora asociada con la dinámica móvil del Pacífico Sur Mexicano, lo que la vuelve vulnerable a sismos y tsunamis.

La roca predominante en la región es el granito, conocido como Tronco de Acapulco (De Cserna, 1965), con una extensión de 60 km<sup>2</sup> y morfología de domo con cresta asimétrica hacia el mar. En su periferia afloran rocas metamórficas y sedimentarias. La edad del conjunto lítico es debatida, con dataciones que oscilan entre el Precámbrico y el Oligoceno (INEGI, 1985) (Figura 2). El granito es



Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio. Fuente: elaboración propia a partir de INEGI (2024).

altamente susceptible a la meteorización diferencial, derivada de la acción de la temperatura y la humedad, lo que da lugar a una evolución morfológica desde estructuras subaéreas hasta domos, crestas, pedrizas, berrocales y tors, intercalados con mantos arenosos. Estas formas constituyen superficies con fuerte inclinación en el relieve cumbre y las laderas del “Anfiteatro”.

La evolución geomorfológica de Acapulco, combinada con precipitaciones extraordinarias, propicia la movilización de materiales, desde detritos hasta grandes bloques, mediante corrientes hiperconcentradas. En este contexto, los huracanes actúan como detonantes de inundaciones, procesos de ladera y daños por vientos. Por ello, resulta necesario un análisis geomorfológico que identifique

condiciones de peligro, particularmente en relación con cortezas de intemperismo, relieve residual y pendientes, elementos cuya movilización depende de la presencia de humedad suficiente.

Además de las condiciones físicas del entorno, el crecimiento urbano acelerado y desordenado de Acapulco impulsado por el turismo desde mediados del siglo XX, ha favorecido la ocupación de zonas de alta susceptibilidad a inundaciones y procesos gravitacionales, como lechos de barrancas, laderas con pendientes pronunciadas y áreas pantanosas (Frausto Martínez *et al.*, 2025; Rodríguez Esteves, 2017). En muchas de estas áreas, la falta de servicios básicos y la presencia de viviendas precarias incrementan la vulnerabilidad de la población, especialmente entre los grupos en situación de

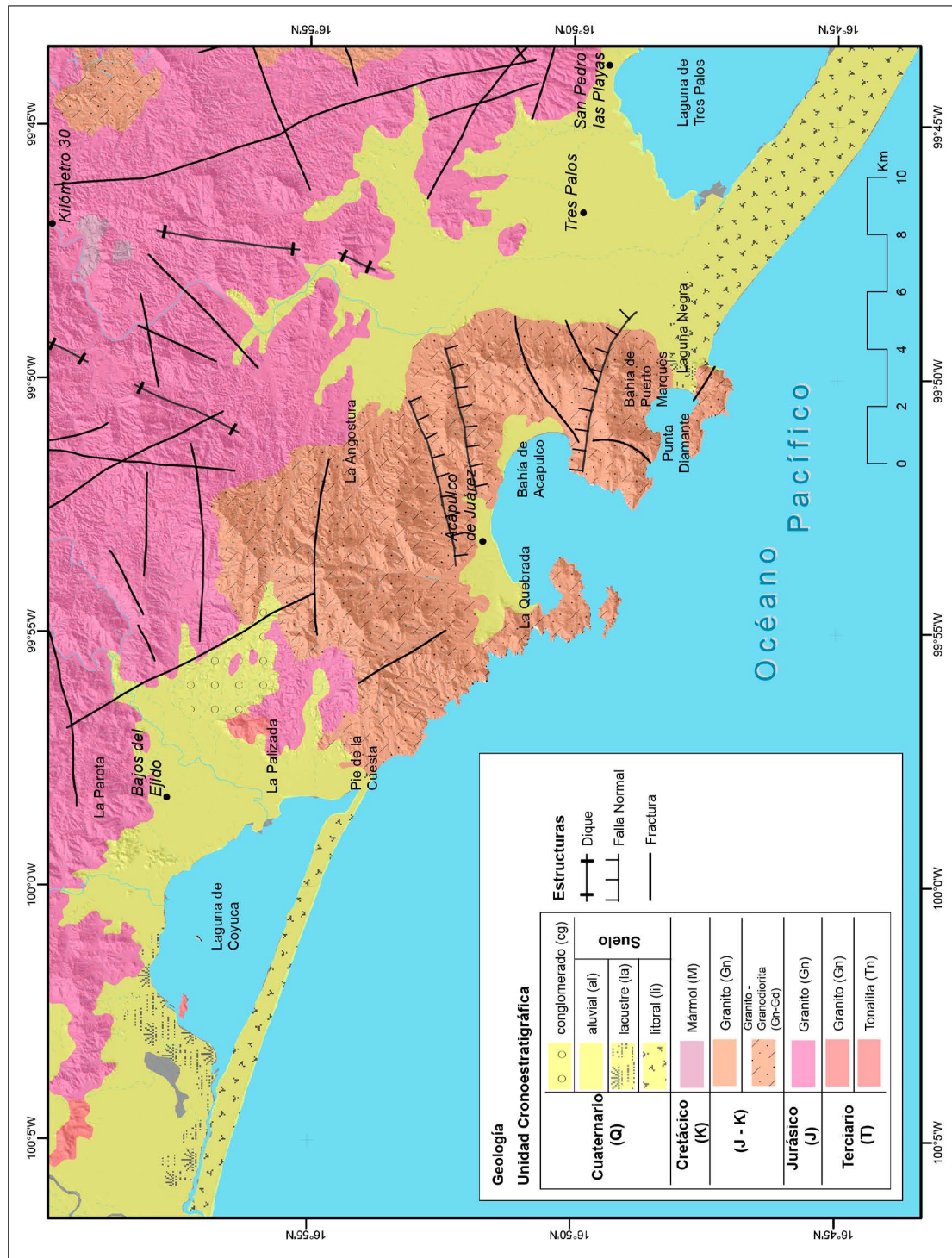


Figura 2. Mapa geológico. Fuente: elaboración propia a partir de INEGI (1985).

pobreza (Frausto Martínez *et al.*, 2025; Manrique González, 2018).

Esta interacción entre una amenaza recurrente como los fenómenos hidrometeorológicos y las condiciones físico-geográficas y socioeconómicas del territorio, constituye un claro ejemplo de construcción social del riesgo. La historia reciente de la ciudad está marcada por eventos devastadores como el huracán Paulina en 1997, las tormentas Ingrid y Manuel en 2013, y los huracanes Otis en octubre de 2023 y John en septiembre de 2024, eventos que evidenciaron la fragilidad de la infraestructura urbana y la vulnerabilidad de la población.

Esta perspectiva subraya que los desastres no son meros efectos de la naturaleza, sino el resultado de una interacción compleja entre procesos naturales y sociales. La ausencia de políticas públicas eficaces, la débil gestión territorial y la limitada inversión en medidas de mitigación han perpetuado estas condiciones de riesgo (Frausto Martínez *et al.*, 2025).

Frente a este panorama, resulta fundamental profundizar en el análisis espacial de las amenazas geomorfológicas. La zonificación de peligros como procesos de ladera e inundaciones basada en el análisis detallado de las características físico-geográficas y su relación con los patrones de ocupación del suelo, constituye una herramienta esencial para la gestión integral del riesgo (Frausto Martínez *et al.*, 2025; Manrique González, 2018). Esta zonificación fundamentada en un análisis morfométrico del relieve proporciona una base sólida para la planeación urbana, el diseño de estrategias de mitigación y la reducción de la vulnerabilidad, contribuyendo a la construcción de una ciudad más resiliente ante futuros eventos en su complejo entorno geomorfológico (Frausto Martínez *et al.*, 2025; Manrique González, 2018; Rodríguez Esteves, 2017).

### **La morfometría, enfoque cuantitativo para el análisis del paisaje**

La morfometría, también conocida como análisis cuantitativo de la superficie terrestre, es una disciplina científica que se enfoca en el análisis matemático y estadístico de la topografía (Minár *et al.*, 2016; Ocaña *et al.*, 2020; Quesada Román y Barrantes Castillo, 2017). Para ello, se basa en la premisa de que la forma de la superficie terrestre

contiene valiosa información sobre su funcionamiento, composición interna y génesis. A diferencia de la geomorfología tradicional, que describe las formas del relieve de manera cualitativa, la morfometría las analiza a través de variables cuantitativas, lo que permite una comprensión más objetiva y reproducible del paisaje (Minár *et al.*, 2016).

Las variables fundamentales que se analizan incluyen a la altimetría, pendiente, densidad del drenaje, profundidad de la disección, energía del relieve, erosión potencial y erosión total (Quesada Román y Barrantes Castillo, 2017; Quesada Román y Feoli Boraschi, 2018; Quesada Román y Zamorano Orozco, 2018, 2019). Para llevar a cabo estos análisis, se utilizan datos geográficos de elevación como son los MDE, tratados con herramientas SIG, las cuales facilitan el procesamiento y la visualización de grandes cantidades de datos.

La morfometría se puede abordar desde dos enfoques principales: el general y el específico. El enfoque general concibe la superficie terrestre como un campo continuo y busca métodos óptimos para expresar e interpretar dicho campo. Por otro lado, la morfometría específica trata las formas del terreno como entidades autónomas u “objetos”. Esta dualidad es similar a los conceptos de onda y partícula en la física, donde uno u otro enfoque es preferible según la situación. En la actualidad, la percepción tradicional del terreno como un conjunto de formas individuales coexiste con el enfoque moderno que utiliza MDE para analizar la superficie como un campo continuo y comúnmente suavizado (Minár *et al.*, 2016).

La aplicación de la morfometría es fundamental para entender la dinámica de procesos naturales como la erosión y la sedimentación, y se ha vuelto una herramienta indispensable en campos tan diversos como la hidrología, la edafología y la ingeniería (Minár *et al.*, 2016). Específicamente, el análisis de los parámetros morfométricos es crucial para comprender la relación entre las características hidrológicas del terreno y sus patrones de flujo. Esto ayuda a determinar el grado de infiltración y escorrentía, así como la producción y el transporte de sedimentos en una cuenca (Méndez-Gutiérrez *et al.*, 2021). Además, el análisis de parámetros morfométricos en conjunto puede ser utilizado

para la evaluación de la susceptibilidad del terreno a ciertos eventos (Alencar da Silva Alves *et al.*, 2021).

La comprensión y gestión de los riesgos naturales, como los procesos de ladera y las inundaciones, son fundamentales para la planificación territorial segura y el desarrollo sostenible (Escorcia Salcedo, 2018; Quesada Román y Feoli Boraschi, 2018; Quesada Román y Zamorano Orozco, 2018). Estos fenómenos pueden causar pérdidas económicas significativas y afectar a las comunidades.

La geomorfología, ciencia que estudia la descripción, génesis, clasificación, procesos y evolución de las formas del terreno, junto con su relación con las estructuras subyacentes, ofrece herramientas esenciales para analizar estos peligros (Escorcia Salcedo, 2018). La morfometría, como una de las técnicas de análisis geomorfológico, proporciona un medio eficaz para abordar estos desafíos.

La aplicación de diversos métodos morfométricos para la zonificación de procesos de ladera e inundaciones se logra al integrar espacialmente los valores obtenidos de diferentes mapas. Esto implica sobreponer los índices numéricos, tanto bajos como altos, para crear nuevos mapas que muestren la incidencia de estos valores. Al categorizar áreas según el nivel de varios indicadores morfométricos, es posible identificar zonas con distintos grados de susceptibilidad (Quesada Román y Zamorano Orozco, 2018).

Una ventaja clave de la morfometría es su bajo costo, fácil acceso a la información base, o la disponibilidad reciente de nubes de puntos por medio de técnicas LiDAR, o técnicas fotogramétricas semiautomatizadas permiten obtener MDE de alta resolución espacial, insumo clave en el análisis morfométrico (Quesada Román y Feoli Boraschi, 2018).

Las mediciones y la obtención de diferentes índices morfométricos son sencillos y pueden realizarse completamente dentro de un SIG, por lo que se convierte en una herramienta eficiente para el análisis y la mitigación del riesgo a desastres mediante la determinación de áreas susceptibles a procesos de ladera e inundaciones, proporcionando una base diagnóstica útil para el ordenamiento territorial (Quesada Román y Feoli Boraschi, 2018).

El análisis cuantitativo del relieve de una re-

gión como Acapulco, puede permitir identificar áreas propensas a la inestabilidad de laderas y la ocurrencia de inundaciones, en relación con las características físicas del terreno que condicionan estos procesos. Este conocimiento es esencial para la planificación del territorio y la implementación de medidas para evitar la configuración de nuevas condiciones de riesgo, mejorando la capacidad de gestión prospectiva y preventiva de la comunidad.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para este trabajo se utilizó como punto de partida el procesamiento del modelo digital de elevación (MDE), como base del análisis morfométrico y geomorfológico. Un MDE es una representación digital de la superficie terrestre, típicamente organizada en una cuadrícula (Guth *et al.*, 2021; Minár *et al.*, 2016). Es importante diferenciar los tipos de MDE, como el modelo digital de superficie (MDS) y el modelo digital de terreno (MDT). Mientras un MDS incluye la parte superior de la vegetación y las construcciones, un MDT, representa la superficie del suelo sin estos objetos. Esta distinción es crucial para cualquier análisis, ya que los resultados pueden variar significativamente dependiendo del tipo de modelo utilizado (Guth *et al.*, 2021; Minár *et al.*, 2016).

En este caso, el MDT utilizado se obtuvo a partir de un mosaico de 14 modelos digitales escala 1:10 000 con una resolución de 5 m por pixel de la colección Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, Terreno en formato ASCII del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), además del uso de cartografía topográfica base escala 1:20,000 (INEGI, 2011, 2012, 2024). A partir del MDT, se generó un modelo sombreado, un mapa altimétrico y uno de pendientes, empleando el software ArcGIS Pro de ESRI.

El modelo sombreado (*Hillshade*) simula la iluminación del terreno para crear una representación tridimensional del relieve. Para complementar esta visualización, se superpusieron las curvas de nivel de la cartografía topográfica de INEGI a escala 1:20 000 (Figura 3a). Esta representación resalta las formas del terreno y la precisión de las líneas

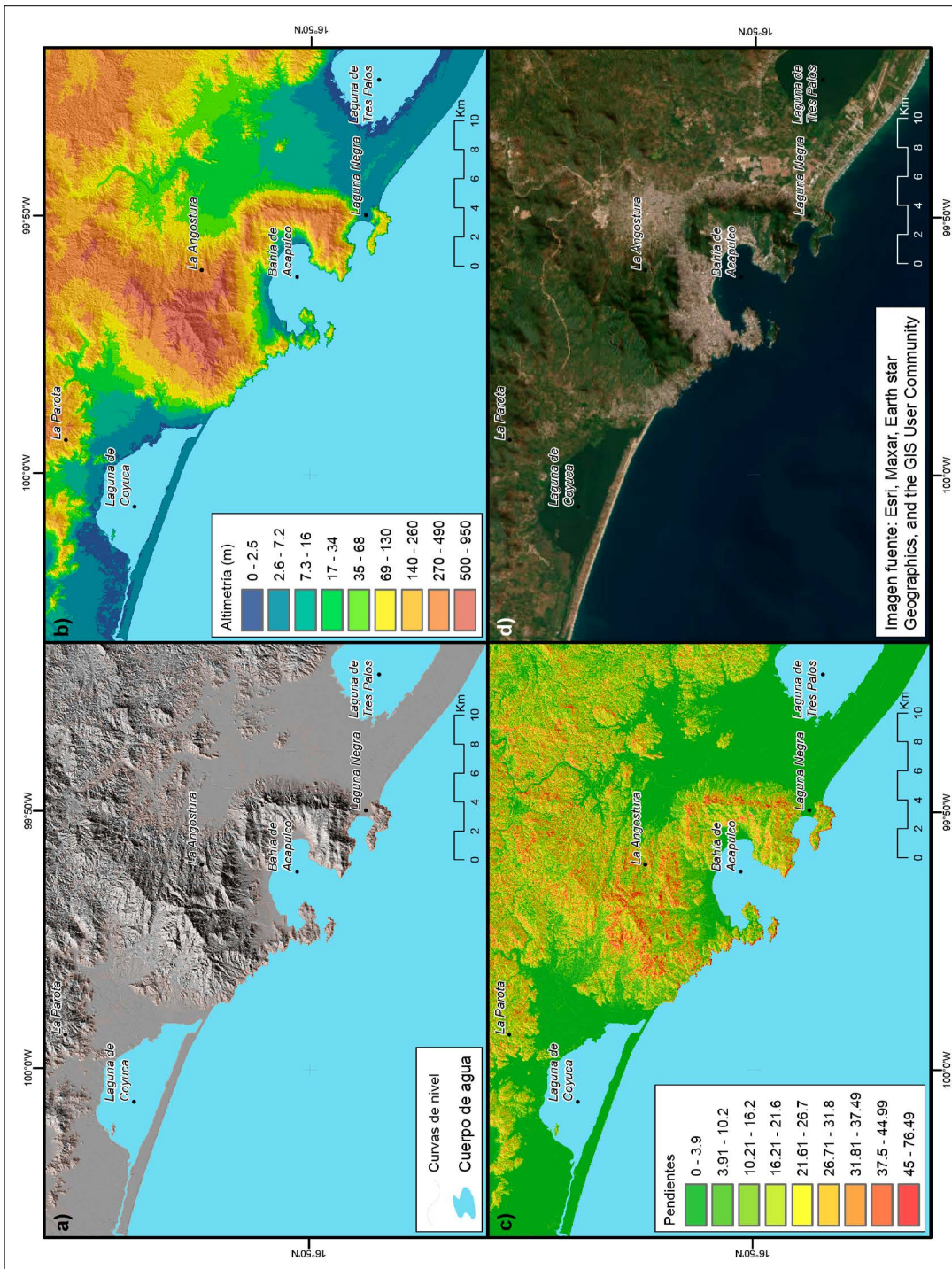


Figura 3. a) Modelo sombreado y curvas de nivel (INEGI, 2011, 2012). b) Mapa altimétrico. Fuente: Elaboración propia a partir de (INEGI, 2011). c) Mapa de pendientes. Fuente: Elaboración propia a partir de (INEGI, 2011). d) Imagen de satélite. Fuente: (ESRI, 2025b).

de contorno, fue crucial para la interpretación, facilitando la regionalización posterior.

Para obtener el mapa altimétrico, se clasificaron los valores de elevación en metros del MDT utilizando el método de intervalos geométricos. Este método definió los pisos altitudinales de manera que cada rango de elevación tuviera un número similar de píxeles, creando una distribución visualmente equilibrada en el mapa. Una vez definidos estos intervalos, se les aplicó una rampa de color para representar la altitud, con tonos que varían desde el verde en las zonas bajas hasta el marrón en las elevaciones más altas (Figura 3b).

El cálculo de la *pendiente del terreno* es fundamental, ya que se relaciona con la fuerza gravitacional en la ocurrencia de movimientos en masa. A mayor inclinación, mayor energía potencial de la masa desplazada, por lo que las zonas de mayor susceptibilidad suelen tener altas pendientes.

Para la determinación de la pendiente, se utilizó la herramienta *Slope* de ArcGIS Pro (ESRI, 2025a), que calcula la inclinación para cada celda del MDT tomando en cuenta las elevaciones de sus celdas vecinas. El resultado representa el cambio máximo de elevación en esa ubicación (Figura 3c). El valor obtenido se puede expresar en grados o porcentaje.

El algoritmo utiliza una ventana de 3x3 celdas, y se basa en la tasa de cambio de elevación en las direcciones horizontal ( $dx$ ) y vertical ( $dy$ ). La pendiente ( $P$ ) se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$P = \sqrt{\left[\frac{dz}{dx}\right]^2 + \left[\frac{dz}{dy}\right]^2}$$

- $\left[\frac{dz}{dx}\right]$  representa el cambio de elevación en el eje X (este-oeste).
- $\left[\frac{dz}{dy}\right]$  representa el cambio de elevación en el eje Y (norte-sur).

Adicionalmente, esta herramienta ofrece dos opciones de cálculo: planar y geodésico (ESRI, 2025b). Para este trabajo se utilizó el método planar, que trata la superficie de la Tierra como un plano 2D y es ideal para datos que ya están en un sistema de coordenadas proyectadas, como la pro-

yección Universal Transversa de Mercator (UTM), es rápido y preciso para áreas locales, como lo es la zona de estudio.

La combinación de estas variables permitió identificar y delimitar de forma manual, y junto con las observaciones y reconocimientos realizados durante las campañas de trabajo de campo, las principales unidades de relieve como zonas de montaña, piedemontes, planicies y barras, estableciendo así una regionalización coherente con las características morfológicas del terreno (Figura 10).

Posteriormente, a partir del MDT, el mapa de pendientes, y la regionalización, se generó la red hídrica utilizando las herramientas del módulo *Hydrology* de ArcGIS Pro. El primer paso fue preparar el MDT eliminando las imperfecciones topográficas. Los MDT a menudo contienen pequeñas depresiones o sumideros (*sinks*), que son errores de medición o rasgos naturales de tamaño menor a la resolución del MDT. El agua no puede fluir fuera de estos sumideros, lo que detendría el flujo en el modelo. Para corregir esto, se utilizó la herramienta *Fill* que rellena estos sumideros y crea una superficie continua y sin obstáculos, garantizando así un flujo de agua uniforme en el modelo.

A partir del MDT sin sumideros, se calculó la dirección de flujo para cada celda. La herramienta *Flow Direction* utiliza el método D8, que determina la dirección en la que el agua fluiría desde cada celda hacia una de sus ocho celdas vecinas, siguiendo la pendiente más pronunciada. Este proceso genera un ráster de dirección de flujo (Figura 4).

Utilizando el ráster de dirección de flujo, se calculó la acumulación de flujo con la herramienta *Flow Accumulation* que determina, para cada celda, el número total de celdas “aguas arriba” que drenan hacia ella. Como capa de ponderación, se empleó la regionalización geomorfológica (Figura 10) para distinguir áreas con pendientes más inclinadas, y otras más planas, lo que permitió modelar la acumulación del escurrimiento de manera más precisa al considerar las diferencias de velocidad del flujo en el terreno. Las celdas con un valor de acumulación de flujo alto corresponden a la acumulación de agua, indicando la ubicación de cauces y ríos. Este ráster es la base numérica para identificar la red hídrica (Figura 5).

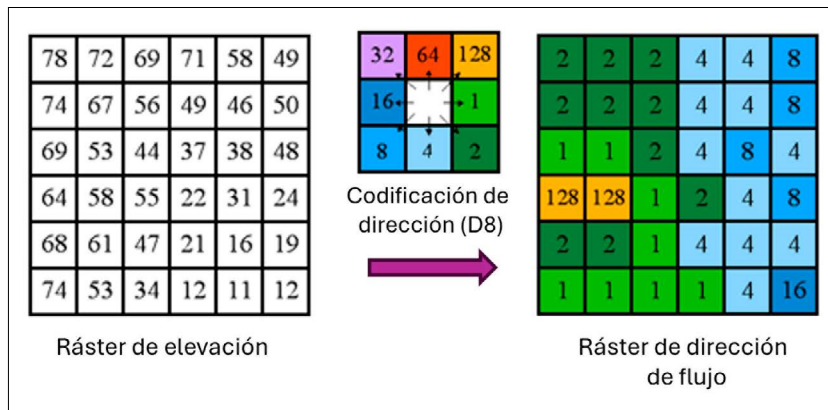


Figura 4. Cálculo del ráster de dirección de flujo, método D8 (ESRI, 2025b).

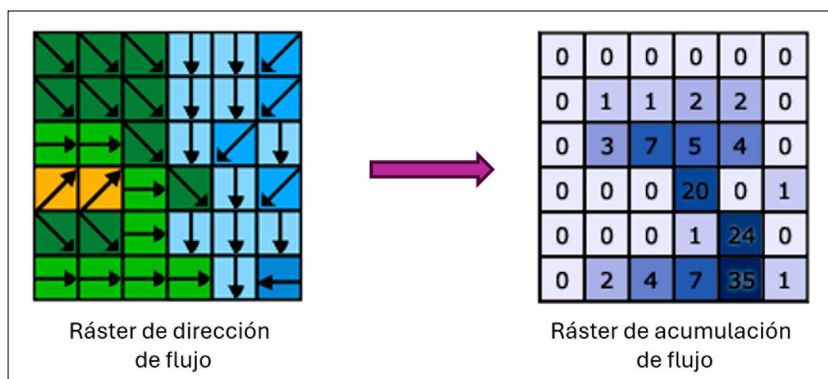


Figura 5. Cálculo del ráster de acumulación de flujo (ESRI, 2025b).

Para delimitar la red hídrica a partir del ráster de acumulación de flujo, se aplicó un umbral o valor de corte. A través de este umbral, se identificaron todas las celdas con una acumulación de flujo superior a un valor mínimo, las cuales se clasificaron como parte de un cauce o arroyo.

Una vez identificados los segmentos de la red hídrica, se clasificaron por orden jerárquico utilizando el método de Strahler (Molina Blancas, 2022) (Figura 6). Este método asigna un orden a cada segmento fluvial, donde los arroyos más pequeños sin afluentes se consideran de primer orden. Cuando dos arroyos del mismo orden se unen, el río resultante aumenta su orden. Esta clasificación proporciona un sistema cuantitativo para analizar la complejidad y estructura de la red de drenaje.

El procesamiento del MDT de alta resolución permite el cálculo de variables morfométricas fundamentales (Guth *et al.*, 2021). La altitud, por ejemplo, es una variable muy importante, ya que tiene un significado físico, representa los niveles

donde la fuerza de gravedad es la misma. A partir de la altitud se derivan otras variables esenciales (Minár *et al.*, 2016). En este estudio, el uso de la densidad y la profundidad de la disección es fundamental, ya que ambas variables permiten cuantificar el grado de incisión de los cauces en el relieve. La densidad de la disección cuantifica la concentración de cauces fluviales, mientras que la profundidad de la disección mide la capacidad de la erosión vertical de los ríos, siendo una diferencia de altura entre el fondo del valle y la ladera inferior. A mayor profundización, las laderas se vuelven más susceptibles a movimientos en masa. Por su parte, la energía del relieve determina la máxima diferencia de altura relativa en un área específica, lo que se traduce en la energía potencial que puede desencadenar procesos gravitacionales.

Para el análisis, las variables se normalizaron, mediante una Estandarización Omega, transformación lineal min-max, ajustada al rango 0–100. Este método fue seleccionado por conservar la

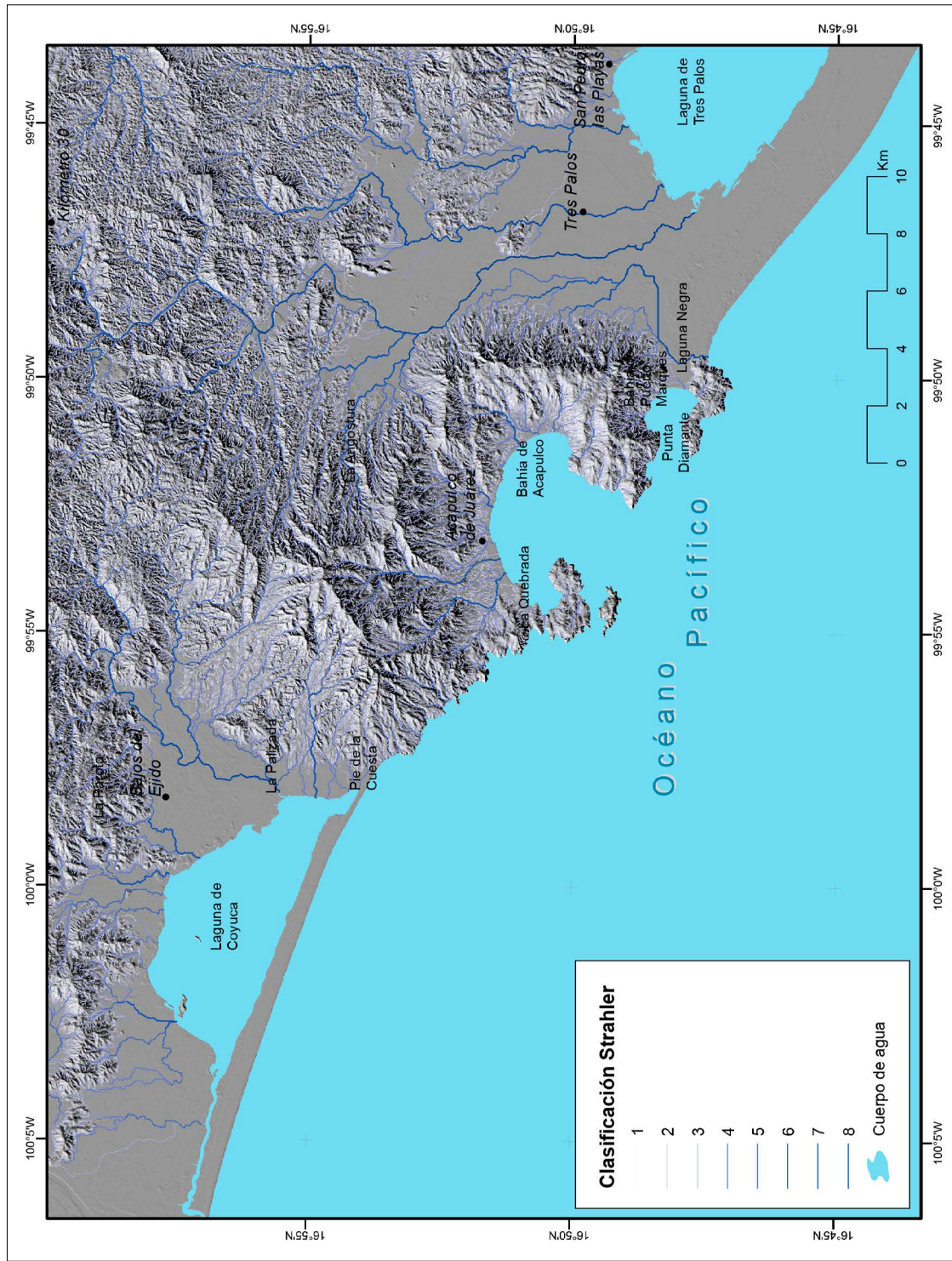


Figura 6. Red hídrica. Fuente: elaboración propia a partir de INEGI (2011).

estructura de distribución original de los datos, permitiendo una interpretación directa, donde 0 representa la mínima expresión del parámetro en la zona y 100 la máxima, sin forzar los datos a una distribución normal.

Para calcular las variables morfométricas se generó una retícula de 500 x 500 m, y se obtuvo una unidad espacial de análisis de 25 000 m<sup>2</sup>. La elección de esta unidad espacial responde a un enfoque de diagnóstico regional. Si bien el MDE base cuenta con alta resolución (5 m), la generalización a esta escala permite filtrar la variabilidad local excesiva y facilitar la identificación de unidades de gestión coherentes, sin perder la representatividad de los grandes dominios morfológicos.

**Densidad de la disección (D):** mide la concentración de cursos fluviales en un área determinada. Permite identificar zonas con menor o mayor concentración de cauces y, por ende, con mayor erosión fluvial. Está condicionada por factores como la competencia del sustrato (tipo de roca), estructuras disyuntivas (fallas o fracturas), la pendiente del terreno, la cobertura vegetal, así como la intensidad y tipo de precipitaciones. Se determina a partir de la red hídrica y calculando su concentración por unidad de área (Figura 7). Una mayor densidad puede indicar una red de drenaje efectiva con alto potencial erosivo (Alencar da Silva Alves *et al.*, 2021; Quesada Román y Barrantes Castillo, 2017; Quesada Román y Feoli Boraschi, 2018; Quesada Román y Zamorano Orozco, 2019).

**Profundidad de la disección (P):** esta variable, debe ser entendida como un indicador de la posi-

ción relativa del relieve y la energía potencial local, más que como una medida absoluta de incisión fluvial. Su inclusión es clave para detectar valles encajonados propensos a flujos de escombros.

Se calcula como la diferencia de altura entre el fondo de valle y la ruptura de pendiente más representativa y cercana a la ladera inferior del valle, expresada en metros por unidad espacial de análisis. Una mayor profundidad puede indicar laderas más susceptibles a procesos de remoción en masa (Aceves Quesada *et al.*, 2014; Alencar da Silva Alves *et al.*, 2021; Quesada Román y Barrantes Castillo, 2017; Quesada Román y Feoli Boraschi, 2018; Quesada Román y Zamorano Orozco, 2019). Para el cálculo se emplea la fórmula:

$$PF = \frac{(E_{mean} - E_{min})}{(E_{max} - E_{min})}$$

Donde:

*PF* = Profundidad de la disección

*E<sub>mean</sub>* = Elevación media

*E<sub>min</sub>* = Elevación mínima

*E<sub>max</sub>* = Elevación máxima

**Energía del relieve (E):** determina la máxima diferencia de altura relativa en metros dentro de la unidad espacial de análisis. Representa la energía potencial disponible para los procesos erosivos y es influenciada por factores como la composición geológica, la susceptibilidad del sustrato a la erosión y la presencia de estructuras disyuntivas. Los valores

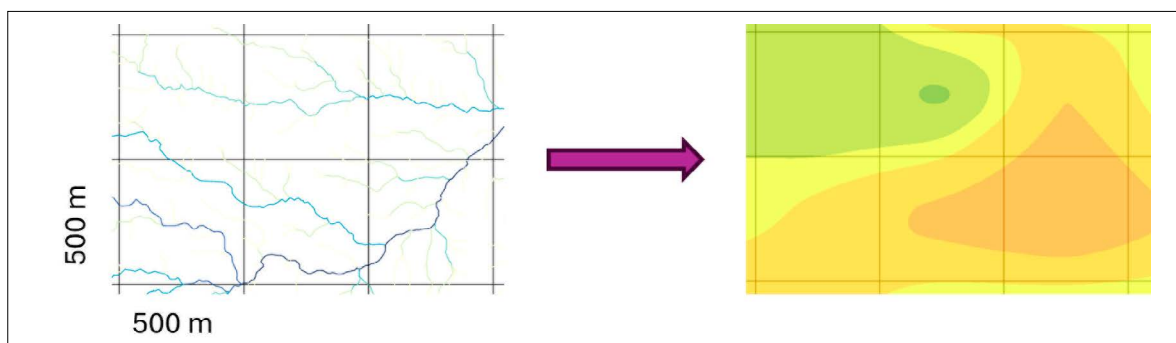


Figura 7. Cálculo de la densidad de la disección: a partir de la red de drenaje (izq.), y mapa ráster de la densidad (der.), que muestra la concentración de cauces. Fuente: elaboración propia.

altos, característicos de zonas de barrancos, indican un mayor potencial erosivo, ya que una pendiente pronunciada es el factor que permite a la fuerza de gravedad convertir eficientemente dicha energía potencial en trabajo erosivo (Escorcía Salcedo, 2018; Quesada Román y Barrantes Castillo, 2017).

El cálculo de la energía del relieve en ArcGIS Pro (ESRI, 2025a) se realiza con la herramienta *Focal Statistics* sobre el MDT. Al seleccionar la estadística *Range*, la herramienta determina la diferencia entre la altitud máxima y mínima para una vecindad definida (ventana de 3 x 3 píxeles), produciendo un nuevo ráster donde cada pixel representa la energía del relieve de su entorno (Figura 8). El valor de cada celda en el ráster resultante se calcula de manera individual mediante la aplicación de la fórmula:

$$\text{Rango Focal} = \text{Máximo Focal} - \text{Mínimo Focal}$$

Donde:

- *Máximo Focal* hace referencia a la altura máxima de la vecindad
- *Mínimo Focal* hace referencia a la altura mínima de la vecindad

**Erosión potencial (EP):** se asocia principalmente con la pendiente e indica la potencialidad de un área a ser susceptible a procesos de ladera (Aceves Quesada *et al.*, 2014; Escorcía Salcedo, 2018; Quesada Román y Zamorano Orozco, 2019). El cálculo se realizó mediante la herramienta de *Raster calculator* en ArcGIS Pro (ESRI, 2025a), aplicando una multiplicación celda por celda entre

la pendiente media y la densidad de la disección, previamente calculada con la fórmula:

$$EP = \text{Pendiente.mean} * DS$$

Donde:

- *Pendiente.mean* hace referencia al valor medio de la pendiente por unidad de análisis
- *DS* hace referencia al valor de densidad de la disección

**Erosión total (ET):** determina las zonas que presentan mayor o menor erosión del relieve basándose en la densidad de las curvas de nivel en un área determinada (Quesada Román y Barrantes Castillo, 2017; Quesada Román y Zamorano Orozco, 2019) (Figura 9). Es especialmente útil para diferenciar áreas con mayor susceptibilidad a la erosión y aquellas con morfologías más antiguas, lo cual se infiere a través de la rugosidad del terreno.

Para identificar zonas susceptibles a procesos de ladera e inundaciones se empleó el modelo de susceptibilidad (*S*) (Cartaya *et al.*, 2006; Quesada Román y Barrantes Castillo, 2017; Quesada Román y Feoli Boraschi, 2018). La integración de las variables se realizó mediante una superposición aritmética simple, a través de un promedio no ponderado. Esta decisión se fundamenta en el principio de parsimonia y en la ausencia de información geotécnica distribuida homogéneamente que justifique la asignación de pesos diferenciados. De este modo, se asume una contribución equipotencial de los cinco factores morfométricos, que se expresa de la siguiente forma:

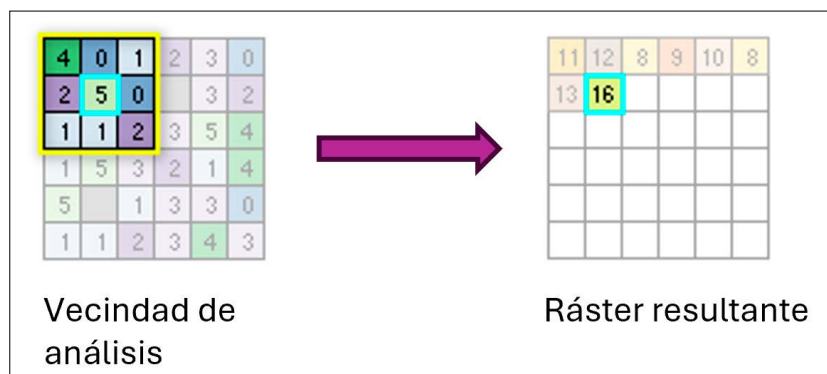


Figura 8. Cálculo del rango focal: la vecindad (amarillo) alrededor de cada celda de procesamiento (cian) identifica qué celdas de entrada (izq.) se utilizarán para calcular el valor estadístico de salida (Rango focal) (der.) (ESRI, 2025b).

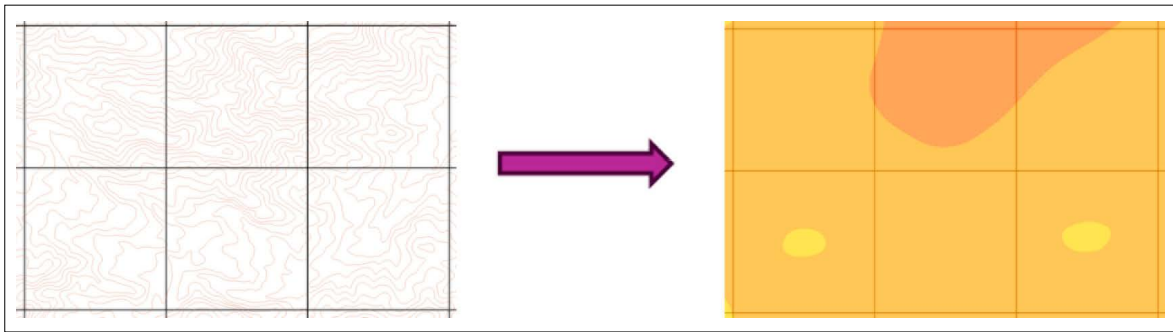


Figura 9. Cálculo de la densidad de las curvas de nivel (izq.), mapa ráster de la densidad (der.). Fuente: elaboración propia.

$$S=(D+P+E+EP+ET)/5$$

Donde:

$S$  = Susceptibilidad a procesos de remoción en masa e inundaciones

$D$  = Densidad de la disección

$P$  = Profundidad de la disección

$E$  = Energía del relieve

$EP$  = Erosión potencial

$ET$  = Erosión total

## RESULTADOS

A partir de la regionalización (Figura 10), se lograron caracterizar y cuantificar las unidades geomorfológicas dominantes en la zona de estudio, revelando un paisaje de marcados contrastes. Se identificaron tres islas con topografía abrupta, las cuales tienen una superficie de apenas 0.87 km<sup>2</sup>, presenta una pendiente media relativamente elevada de 23.43° y una altitud media de 35.73 m (Tabla 1). Muy diferente es la barra, una extensa formación costera de 41.65 km<sup>2</sup>, con una pendiente media de 1.03° y una altitud media de apenas 4.19 m, que evidencia una zona plana y cercana al nivel del mar.

Las planicies costeras, exlagunar y fluvial abarcan superficies de 2.86, 66.52 y 100.08 km<sup>2</sup> respectivamente. Estas tres regiones presentan pendientes suaves, inferiores a los 2°, y altitudes medias que oscilan entre los 3.70 m (exlagunar) y los 22.26 m (fluvial), lo que las convierte en

zonas potencialmente susceptibles a inundaciones o afectaciones por el ascenso del nivel del mar, pero también propicias para actividades agrícolas y asentamientos humanos.

En la transición hacia el relieve montañoso se ubican los piedemontes. El inferior, con 8.66 km<sup>2</sup>, presenta una pendiente media de 5.91° y una altitud media de 57.45 m, mientras que el superior, de 11.32 km<sup>2</sup>, se eleva a 138.24 m con una pendiente más pronunciada de 8.34°. Estas regiones representan zonas de acumulación y transición entre las tierras bajas y las montañas.

Las montañas se dividen en dos categorías, las montañas parcialmente sepultadas, aunque de superficie limitada (1.64 km<sup>2</sup>), tienen una pendiente media de 13.86° y una altitud de 68.80 m, lo que indica la presencia de relieves intermedios probablemente cubiertos por sedimentos. Finalmente, la región de montaña abarca la mayor superficie, con 383.06 km<sup>2</sup>, y se caracteriza por pendientes marcadas de 19.72° y una altitud media de 214.02 m, constituyendo el relieve dominante del entorno, clave en la dinámica geomorfológica de la región.

El análisis de la densidad de la disección (Figura 11a) en la región revela cómo el agua ha esculpido el paisaje a lo largo del tiempo. Las áreas con una baja densidad de disección, con valores que van de 0 a 27.45, se caracterizan por tener un relieve poco fragmentado, con escaso encajonamiento de los ríos y una menor energía erosiva. Estas zonas se asocian principalmente con las planicies fluviales, exlagunares y costeras, así como con las barras litorales y algunas partes bajas del piedemonte. Un

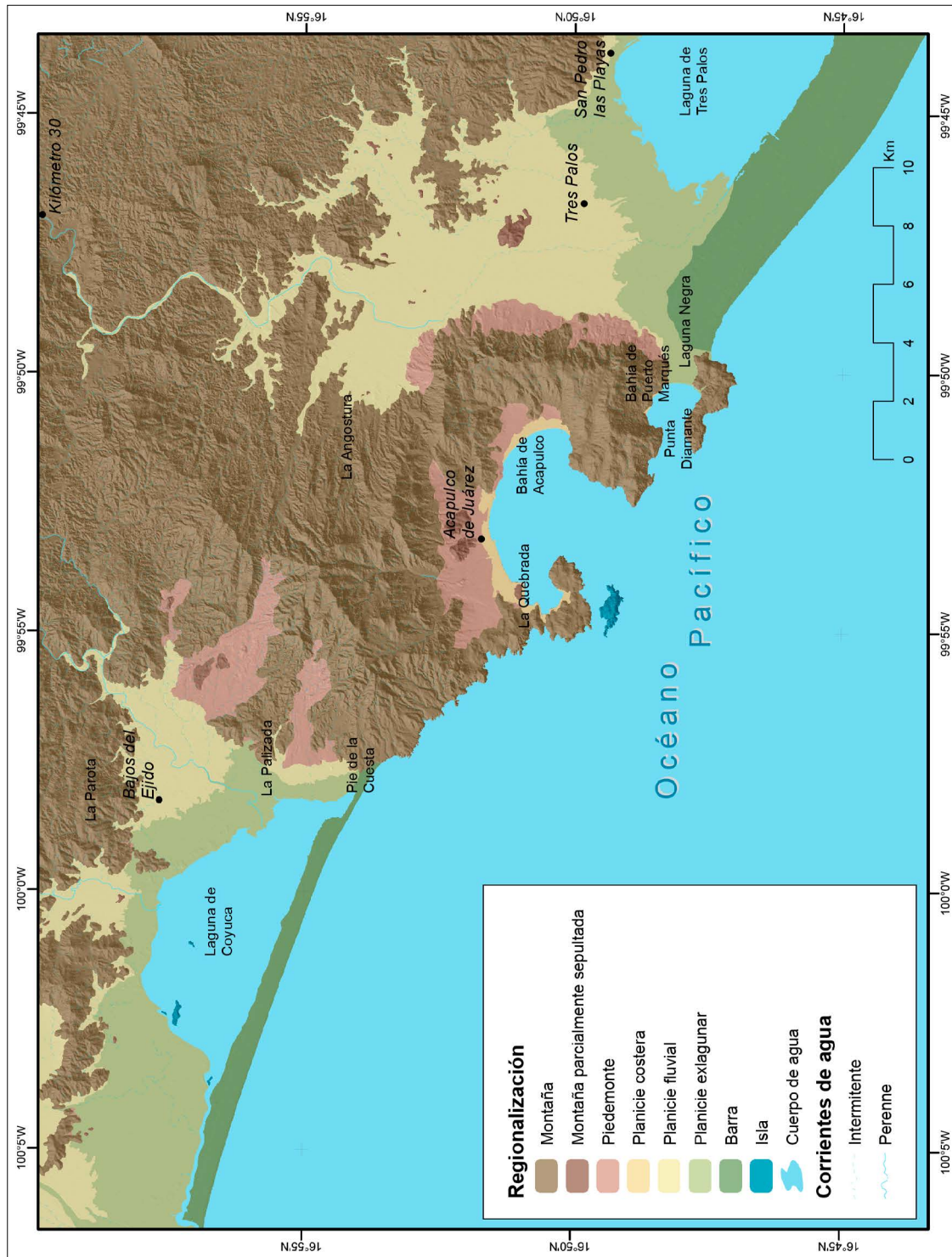


Figura 10. Mapa de regionalización. Fuente: elaboración propia, a partir de INEGI (2011, 2012).

Tabla 1. Características generales del área.

Región	Superficie en km <sup>2</sup>	Pendiente media en °	Altitud media en msnm
Isla	0.87	23.43	35.73
Barra	41.65	1.03	4.19
Planicie costera	2.86	1.92	4.18
Planicie exlagunar	66.52	0.86	3.70
Planicie fluvial	100.08	1.80	22.26
Piedemonte inferior	8.66	5.91	57.45
Piedemonte superior	11.32	8.34	138.24
Montaña parcialmente sepultada	1.64	13.86	68.80
Montaña	383.06	19.72	214.02

Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2011).

claro ejemplo de esto se observa en las áreas planas y costeras cercanas a la Laguna de Tres Palos, la barra costera y parte del valle fluvial, donde la baja disección es evidente.

Por otro lado, existen áreas con un grado intermedio de disección, cuyos valores se sitúan entre 27.26 y 53.33, que suelen corresponder a zonas de transición como los piedemontes. Finalmente, los valores más altos, que van de 53.34 a 100, señalan una intensa fragmentación del relieve, lo que sugiere la presencia de numerosos cauces o barrancas muy desarrolladas en el paisaje.

Al analizar la profundidad de la disección (Figura 11b), se hace evidente la intensidad con la que los ríos han tallado el paisaje de Acapulco. Las zonas con una disección más superficial, con valores entre 0 y 17.65, se encuentran principalmente en las planicies costeras, como en los alrededores de las lagunas de Coyuca y Tres Palos. Estas áreas, de relieves planos o suavemente ondulados, han experimentado una menor erosión vertical, lo que las hace potencialmente más estables ante deslizamientos, pero a la vez, más propensas a sufrir inundaciones.

En las áreas de transición entre las planicies y el piedemonte, se observa una disección media, con valores de 17.66 a 46.67, donde el relieve comienza a mostrarse más fragmentado debido a una mayor actividad de los ríos. Finalmente, las zonas con la disección más profunda, que alcanzan valores

de hasta 100, se concentran en las partes altas del “Anfiteatro” natural de la región, en puntos como La Angostura y Puerto Marqués. Estos lugares se caracterizan por una topografía accidentada, con pendientes pronunciadas y barrancas profundas, condiciones que elevan el riesgo de procesos de remoción en masa, especialmente durante la temporada de lluvias.

El análisis de la energía del relieve (Figura 11c) permite entender el dinamismo del paisaje de Acapulco. Las zonas con la energía más baja, cuyos valores van de 0 a 23.53, corresponden a las planicies y áreas de relieve suavemente ondulado, como el que se encuentra cerca de las lagunas de Tres Palos y Coyuca, San Pedro las Playas, Pie de la Cuesta y Palizada. Naturalmente, esto también incluye las zonas más cercanas al nivel del mar.

A medida que el terreno se eleva, se aprecian valores de energía media (entre 23.54 y 54.12), que marcan transiciones altitudinales moderadas, especialmente hacia el piedemonte superior. En estos lugares, la morfología se vuelve más accidentada y el escurrimiento del agua es más dinámico. Finalmente, la energía más alta (de 54.13 a 100) se concentra en las partes más elevadas del “Anfiteatro”, como en el cerro El Veladero al norte, hacia el noreste de la sierra y al sureste en áreas como La Angostura, Puerto Marqués y Punta Diamante. Estas zonas se caracterizan por grandes diferencias de altura en distancias cortas, lo que se traduce en un

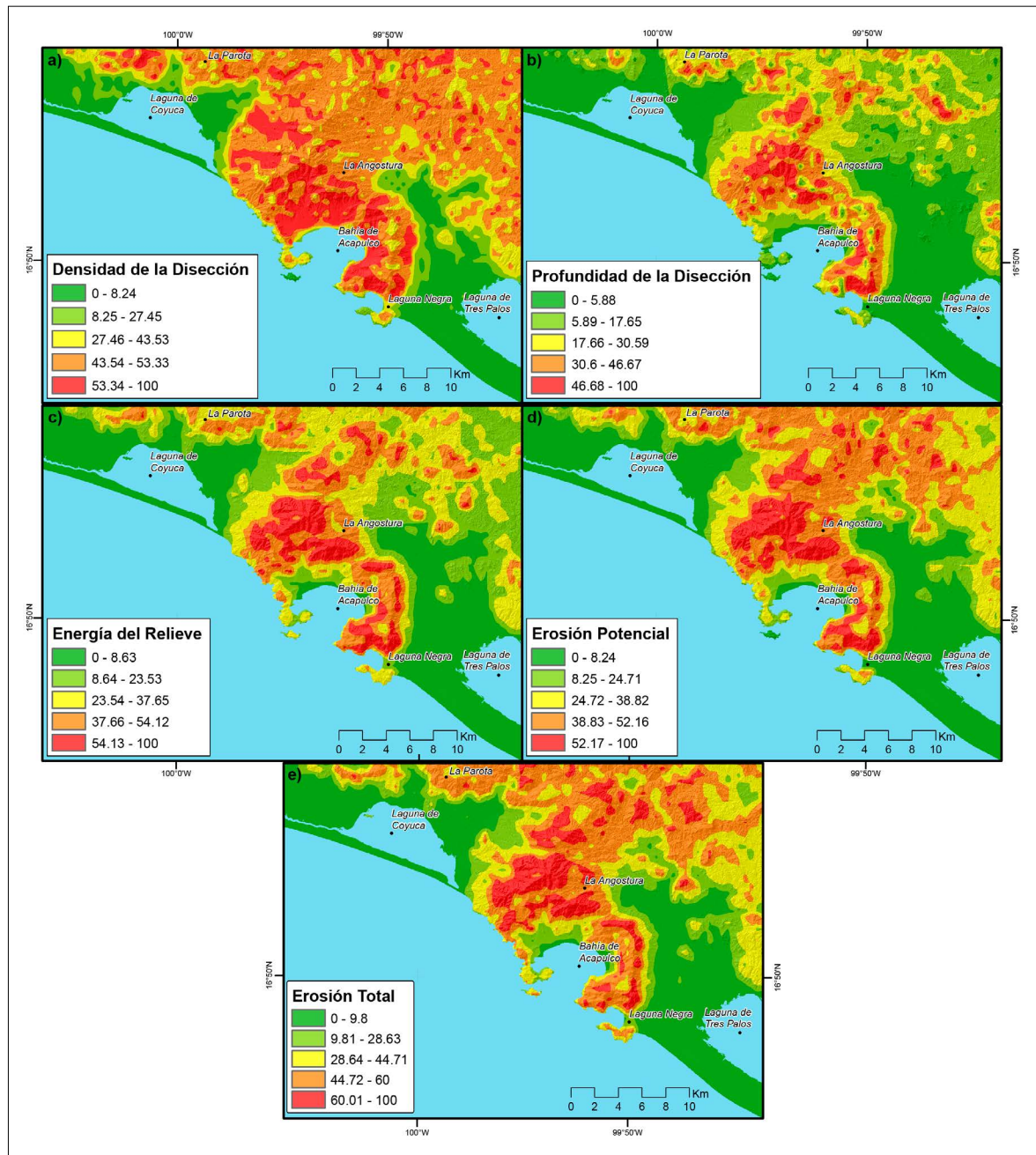


Figura 11. Mapas de: a) Densidad de la disección. b) Profundidad de la disección. c) Energía del relieve. d) Erosión potencial. e) Erosión total. Fuente: elaboración propia.

relieve abrupto, con pendientes fuertes y una mayor susceptibilidad a los procesos de remoción en masa.

El mapa de erosión potencial (Figura 11d) permite identificar las áreas más propensas a la pérdida

de suelo en Acapulco. Las zonas más estables, con valores muy bajos (de 0 a 8.24), se sitúan en las planicies costeras, como en los alrededores de la Laguna de Coyuca, Tres Palos, San Pedro las Playas

y en partes de Punta Diamante y La Quebrada. Estas son áreas con pendientes suaves o nulas, donde los procesos de acumulación de material superan a los de erosión.

A medida que el terreno gana pendiente, la erosión potencial comienza a aumentar. En las zonas de transición de planicies a laderas, como al norte de Puerto Marqués y al este de la Bahía de Acapulco, encontramos un nivel de erosión de baja a media (de 8.25 a 24.71). Aquí, la erosión se intensifica, especialmente durante lluvias fuertes o cuando se pierde la cubierta vegetal.

Se puede apreciar que, en las laderas de colinas y serranías cercanas a La Angostura, al norte de Acapulco y entre la Bahía y Puerto Marqués, los valores son de medio-altos (de 24.72 a 52.16). En estos lugares, la pendiente y la forma del terreno facilitan la formación de surcos y cárcavas. Finalmente, las zonas críticas del mapa, con los valores más altos (de 52.17 a 100), se localizan al norte y este de Acapulco, en las sierras costeras y en zonas urbanas inclinadas como La Angostura y Punta Diamante. En estos puntos, la combinación de pendientes fuertes, un relieve muy fragmentado y la posible falta de vegetación crea las condiciones perfectas para una erosión acelerada, aumentando la susceptibilidad a deslizamientos y flujos de lodo.

El mapa de erosión total (Figura 11e) evidencia una distribución espacial diferenciada de los niveles de pérdida de suelo, como resultado de la influencia de los factores morfológicos, antrópicos y de cobertura vegetal. Las áreas más protegidas, con una erosión muy baja (valores de 0 a 9.8), se encuentran en los entornos de las lagunas de Coyuca y Tres Palos, así como en las zonas planas cerca de San Pedro las Playas y los bordes de la bahía. En estos lugares, las pendientes mínimas y la vegetación densa ayudan a retener el suelo, favoreciendo incluso la acumulación de sedimentos en lugar de su pérdida.

En las zonas de transición entre planicies y laderas, como en los alrededores de Tres Palos y Bajos del Ejido, se encuentra una erosión baja (de 9.81 a 28.63), que se manifiesta de manera más difusa. La situación cambia en las franjas cercanas a laderas urbanizadas y áreas intervenidas, como en los flancos

de La Angostura, partes de Acapulco y las colinas próximas a Puerto Marqués. Aquí, la erosión es moderada (de 28.64 a 44.71) y se hace visible a través de la formación de surcos, especialmente donde la vegetación ha sido alterada o eliminada.

Finalmente, los niveles más altos de erosión (entre 44.72 y 60) aparecen en laderas urbanizadas que han crecido de forma desordenada y sin un control adecuado de las aguas pluviales. Estas áreas, que a menudo coinciden con corredores de expansión urbana en terrenos inclinados, muestran una fuerte influencia de la actividad humana en la aceleración de la erosión. Son zonas propensas a la formación de cárcavas y a la inestabilidad de taludes, lo que resulta en una pérdida significativa de suelo.

Al combinar e integrar las diversas variables morfométricas, se logró crear un modelo de susceptibilidad que identifica las zonas críticas por su dinámica superficial y sus riesgos naturales. En el área de estudio se identificaron distintos niveles de susceptibilidad a la ocurrencia de inundaciones y procesos de ladera (Figura 12). En el caso de la susceptibilidad a inundaciones, el nivel medio abarca la mayor proporción del área, con un 16.96 %, seguido del nivel bajo con un 4.53 %, y finalmente el nivel alto con un 2.36 %.

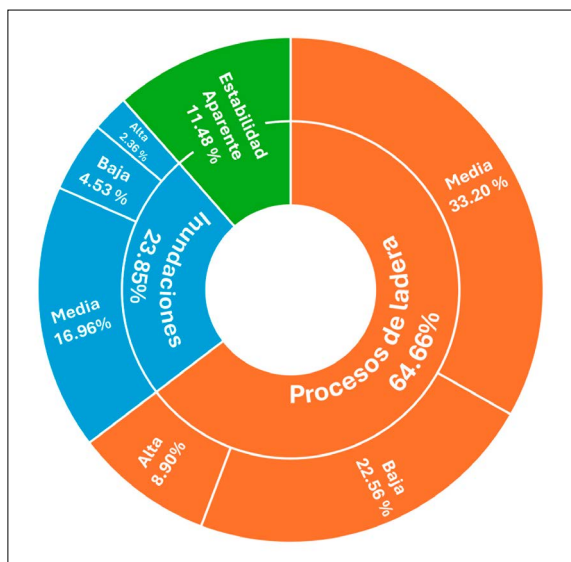


Figura 12. Distribución porcentual de los niveles de susceptibilidad. Fuente: elaboración propia.

Por su parte, la susceptibilidad a la ocurrencia de procesos de ladera muestra una mayor incidencia. El nivel medio representa el 33.20 % del área, el nivel bajo el 22.56 %, y el nivel alto el 8.90 %, lo que indica una mayor propensión general al desarrollo de estos procesos en comparación con las inundaciones.

El 11.48 % del área presenta una estabilidad aparente, lo que sugiere que, si bien no se identifican signos evidentes de susceptibilidad, pueden existir condiciones latentes que requieran atención.

Finalmente, el mapa de susceptibilidad resultante (Figura 13a) clasifica el territorio en tres niveles: baja, media y alta susceptibilidad. Los resultados se agrupan en tres categorías geomorfológicas principales:

Zonas de susceptibilidad a procesos de ladera, localizadas principalmente en laderas abruptas, con fuerte disección y altos índices de erosión, muchas de ellas urbanizadas o en proceso de ocupación informal.

Zonas de susceptibilidad a inundaciones, ubicadas principalmente en depresiones o planicies con baja energía del relieve, pero drenaje deficiente, algunas con asentamientos urbanos consolidados.

Zonas de estabilidad geomorfológica aparente, que coinciden con áreas de baja disección y erosión moderada, donde el peligro geomorfológico es relativamente bajo, aunque no ausente.

La comparación entre el mapa de susceptibilidad y los daños reales reportados por Copernicus EMS, confirman una alta capacidad diagnóstica (Figura 13b, página siguiente).

En cuanto a los procesos de remoción en masa, el modelo demostró una precisión crítica al confirmar que el 80.5% de los deslizamientos registrados ocurrieron en zonas clasificadas como de susceptibilidad alta. Esta eficacia se vuelve más contundente al analizar de forma acumulada las categorías media y alta, las cuales explican el 98.5% de los deslizamientos observados. Lo anterior se valida visualmente mediante la cartografía, donde los eventos reales se concentran casi exclusivamente en zonas de montaña identificadas con riesgo alto, particularmente en la periferia de la Bahía de Acapulco y las elevaciones de Puerto Marqués.

Respecto a las inundaciones, el modelo logró una cobertura de riesgo significativa al captar el 46.3% del área inundada y el 25.3% de la huella hídrica dentro de las categorías de susceptibilidad alta y media. No obstante, un 21.2% de las inundaciones afectó áreas clasificadas como “estabilidad aparente”, lo que evidencia que la magnitud extraordinaria del huracán Otis superó los umbrales y alcanzó zonas de transición entre la planicie y la montaña. A pesar de esta dispersión, se observó una precisión geográfica casi total en las llanuras costeras y los sistemas lagunares de Coyuca y Tres Palos, donde la coincidencia espacial valida la eficacia de la zonificación.

## DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos mostraron una clara diferenciación espacial de los peligros geomorfológicos que coincide con la configuración geológica descrita por De Cserna, (1965) y la dinámica urbana reciente. La alta susceptibilidad a procesos de ladera (8.9% del área de estudio) se concentra en el macizo granítico del “Anfiteatro”, específicamente en áreas de fuerte presión urbana y asentamientos irregulares, como la Angostura y las laderas superiores de la bahía de Acapulco. Esto corrobora lo señalado por Frausto Martínez *et al.*, (2025) sobre la construcción social del riesgo: las zonas identificadas como inestables (pendiente  $>20^\circ$  y alta energía del relieve) son precisamente donde la expansión urbana ha desafiado las limitaciones físicas del terreno. Por su parte, la susceptibilidad a inundaciones, aunque menor en extensión (2.36% en nivel alto), es crítica por localizarse en zonas de alta plusvalía y densidad turística como Punta Diamante o en asentamientos periféricos vulnerables, como Laguna de Tres Palos, confirmando patrones observados en eventos previos como el huracán Paulina (Rodríguez Esteves, 2017).

Si bien este modelo representa una zonificación de susceptibilidad por la propensión intrínseca del terreno y no un cálculo probabilístico de riesgo, la superposición de los resultados con las zonas afectadas por el huracán Otis (Copernicus, 2023) ofrece una verificación espacial cualitativa de su

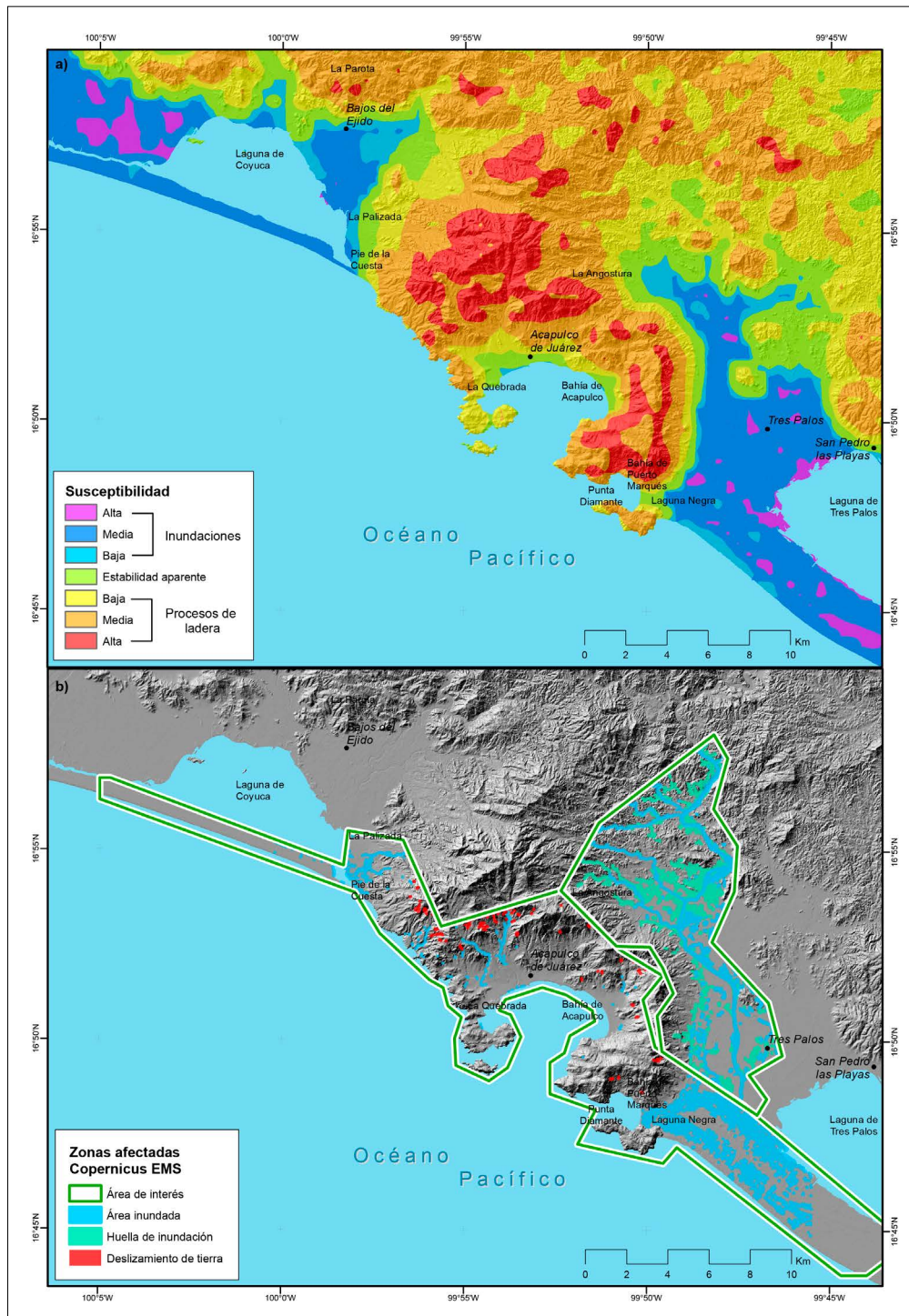


Figura 13. Mapas de: a) Susceptibilidad a procesos de remoción en masa e inundaciones. Fuente: elaboración propia. b). Susceptibilidad y las principales zonas afectadas, Copernicus EMS. Fuente: elaboración propia, con información de Copernicus (2023).

capacidad diagnóstica. Se observa una correspondencia significativa entre las áreas clasificadas con susceptibilidad “Alta” y “Media” y los polígonos de deslizamientos y daños severos reportados por Copernicus. Esta coincidencia sugiere que las variables morfométricas seleccionadas, particularmente la energía del relieve y la densidad de la disección, actúan como indicadores robustos de la fragilidad del paisaje ante detonantes hidrometeorológicos extremos. Sin embargo, es importante notar que el daño observado durante Otis también dependió de la velocidad del viento, un factor poco considerado en este análisis geomorfológico, lo que explica por qué algunas zonas de “baja” susceptibilidad morfométrica sufrieron daños en infraestructura, aunque no necesariamente procesos de remoción en masa, ni inundaciones.

Es fundamental discutir las decisiones metodológicas que sustentan este modelo. En primer lugar, la elección de una unidad de análisis de 500 x 500 m, derivado de un MDT de alta resolución, responde a un enfoque de diagnóstico regional. Aunque esta generalización espacial podría atenuar procesos de escala local, como los deslizamientos puntuales en un talud de carretera, si permite identificar “hotspots” para la priorización en el ordenamiento territorial, evitando el ruido excesivo de un análisis celda por celda en una superficie tan extensa, y que posteriormente se pueda realizar un análisis local, en áreas seleccionadas.

Respecto al modelo integrado, se optó por un promedio aritmético simple de las variables bajo el principio de parsimonia, asumiendo una contribución equivalente de los factores en ausencia de datos geotécnicos detallados que permitieran una ponderación diferenciada. Si bien esto simplifica la complejidad biofísica, ha demostrado ser funcional para una primera zonificación indicativa.

En este sentido, debe reconocerse que la falta de parámetros geotécnicos *in situ* limita la capacidad del modelo para predecir fallas específicas de taludes. Por lo tanto, esta zonificación no sustituye a los estudios de mecánica de suelos, sino que sirve como una herramienta de tamizaje para dirigir dichos estudios hacia áreas prioritarias.

Por otro lado, la zonificación resultante puede tener una implicación directa en la actualización de

los atlas de riesgos y los planes de desarrollo urbano. El hecho de que el 33.20% del área presente una susceptibilidad media a procesos de ladera, alerta sobre la necesidad de restringir la densificación urbana en el piedemonte y las laderas medias. Para las zonas de planicie con alta susceptibilidad a inundación, los resultados sugieren que las medidas estructurales, como el drenaje, pueden ser insuficientes si no se acompañan de la conservación de los cuerpos lagunares que actúan como vasos de regulación, evidenciando la necesidad de soluciones basadas en la naturaleza para la resiliencia costera.

## CONCLUSIONES

El análisis morfométrico implementado demostró ser una metodología eficaz, accesible y replicable para la zonificación de peligros en el complejo entorno de Acapulco, Guerrero. Mediante el procesamiento de un MDE de alta resolución y a cuantificación de variables como la densidad y profundidad de la disección, energía del relieve y la erosión, se logró espacializar con precisión las zonas críticas del territorio.

Los resultados indican que la mayor parte del área es propensa a procesos de ladera, con un 33.20%, en nivel medio, y un 8.90% en nivel alto, concentrándose esta peligrosidad en el relieve montañoso del “Anfiteatro”, Punta Diamante y Puerto Marqués. Paralelamente, la susceptibilidad a inundaciones afecta al 19.32% del área, niveles medio y alto, principalmente en las planicies costeras y sistemas exlagunares de Coyuca y Tres Palos.

La principal fortaleza de este trabajo es su validación empírica. La correspondencia entre la zonificación y los daños reportados por Copernicus EMS confirmó la fiabilidad diagnóstica, al corroborar que el 80.50% de las áreas de mayor afectación coinciden con las zonas marcadas como de alta susceptibilidad. Esto ratifica a las variables morfométricas como indicadores robustos para la delimitación de riesgos. Asimismo, aunque la magnitud de Otis inundó zonas de aparente estabilidad, los sectores de mayor vulnerabilidad identificados por el modelo mostraron una coincidencia espacial con las inundaciones reales. Esto

lo valida como una herramienta científica esencial para el ordenamiento territorial, permitiendo establecer bases de seguridad mínima en regiones de alta susceptibilidad.

Si bien la investigación constituye una base sólida, su naturaleza es diagnóstica y regional, por lo que el trabajo futuro debe transitar hacia un análisis multiescalar. Se recomienda profundizar en las zonas identificadas como críticas mediante validación en campo y el uso de tecnologías de mayor resolución, como fotogrametría con drones y sistemas LiDAR.

Finalmente, estos resultados poseen un alto potencial para ser incorporados en planes de desarrollo urbano, atlas de riesgos y sistemas de alerta temprana. La zonificación aquí presentada ofrece un insumo técnico fundamental para priorizar acciones de mitigación y fortalecer la resiliencia de Acapulco. El siguiente paso consiste en avanzar hacia metodologías híbridas que integren este enfoque morfométrico con análisis geotécnicos, hidrológicos y socioeconómicos, logrando así una comprensión integral del riesgo en uno de los espacios costeros más dinámicos y vulnerables de México.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Dr. Luis Miguel Tanarro García y a Emmanuel Zúñiga Tovar por la revisión crítica del manuscrito y sus valiosos comentarios, los cuales contribuyeron significativamente a mejorar la calidad de este trabajo.

## REFERENCIAS

- Aceves Quesada, F., Legorreta Paulín, G. y Álvarez Ruíz, Y. (2014). Cartografía geomorfológica para el inventario de procesos gravitacionales en la cuenca endorreica del arroyo La Ciénega, flanco oriental del volcán Nevado de Toluca. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 66(2), 329–342.
- Alencar da Silva Alves, K. M., Parodi Dávila, M. C., Zimmermann García, E. D., Rodrigues de Lira, D. y De Araujo Monteiro, K. (2021). Caracterización morfométrica de la cuenca del Salado Bajo, Región de Atacama, Chile. *Investigaciones Geográficas*, (62), 90. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2021.64574>
- Cartaya, S., Méndez, W. y Pacheco, H. (2006). Modelo de zonificación de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa a través de un Sistema de Información Geográfica. *Interciencia*, (31).
- Copernicus. (2023). *Copernicus EMS*. Tropical Cyclone OTIS-23 in Acapulco, Mexico. <https://mapping.emergency.copernicus.eu/activations/EMSR703/>
- Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. P., Fotopoulou, S., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitilakis, K., Winter, M. G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervás, J. y Smith, J. T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 209–263. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8>
- De Cserna, Z. (1965). Reconocimiento geológico en la Sierra Madre del Sur, entre Chilpancingo y Acapulco, Estado de Guerrero. *Boletín Del Instituto de Geología*, (62).
- Escorcia Salcedo, H. A. (2018). *Análisis de riesgos geomorfológicos de la parte alta de la subcuenca río Monquirá, Sogamoso, Boyaca*. Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.
- ESRI. (2025a). *ArcGIS Pro* (3.5.3). <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/get-started/download-arcgis-pro.htm>
- ESRI. (2025b). *esri.com*.
- Frausto Martínez, O., Morales Hernández, J. C., Villa-señor Franco, A., Aguilar Becerra, C. D. y Carreto Gutiérrez, J. A. (2025). *Resiliencia ante el Huracán OTIS. Lecciones aprendidas en la gestión del desastre en Acapulco, Guerrero*. Universidad Autónoma de Guerrero.
- Guth, P. L., Van Niekerk, A., Grohmann, C. H., Muller, J. P., Hawker, L., Florinsky, I. V., Gesch, D., Reuter, H. I., Herrera-Cruz, V., Riazanoff, S., López-Vázquez, C., Carabajal, C. C., Albinet, C. y Strobl, P. (2021). Digital elevation models: Terminology and definitions. *Remote Sensing*, 13(18), 1–19. <https://doi.org/10.3390/rs13183581>
- INEGI. (1985). *Geografía y Medio Ambiente*. Geología. <https://www.inegi.org.mx/temas/geologia/>
- INEGI. (2011). *Relieve Continental*. Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, Con Resolución de 5m. <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>
- INEGI. (2012). *Geografía y Medio Ambiente*. Topografía Escala 1:20,000. <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/>
- INEGI. (2024). *Geografía y Medio Ambiente*. Marco Geoestadístico Nacional. <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/>

- (IPCC), I. P. on C. C. (2023). Glossary. In *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability*. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.029>
- Manrique González, I. (2018). *Vulnerabilidad y susceptibilidad ante inundaciones en la ciudad de Acapulco de Juárez, Guerrero, 2000 y 2010* [Maestría]. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Méndez-Gutiérrez, A. G., Corral-Rivas, S., Nájera-Luna, J. A., Cruz-Cobos, F. y Pompa-García, M. (2021). Análisis morfométrico de la cuenca El Salto, Durango, México. *Terra Latinoamericana*, (39), 1–11. <https://doi.org/10.28940/TERRA.V39I0.641>
- Minár, J., Krcho, J. y Evans, I. S. (2016). Geomorphometry: Quantitative Land-Surface Analysis. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.10260-x>
- Molina Blancas, E. J. (2022). *Análisis espacial con Sistemas de Información Geográfica del riesgo de inundación en el Sector Hacienda-Margarita, Puebla*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Ocaña, R. E., Flores, D. G., Pittaluga, M. A. y Cortez Taillant, V. S. (2020). Aplicación de índices geomorfométricos, para el análisis del sistema erosivo fluvial de la cuenca matagusanos. Precordillera de San Juan. *Revista de La Asociación Geológica Argentina*, 77(1), 174–191.
- Quesada Román, A. y Barrantes Castillo, G. (2017). Modelo morfométrico para determinar áreas susceptibles a procesos de ladera. *Investigaciones Geográficas*, (94), 12. doi: [dx.doi.org/10.15446/rcdg.v25n1.52590](https://doi.org/10.15446/rcdg.v25n1.52590)
- Quesada Román, A. y Feoli Boraschi, S. (2018). Comparación de la Metodología Mora-Vahrson y el Método Morfométrico para Determinar Áreas Susceptibles a Deslizamientos en la Microcuenca del Río Macho, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, (61), 17–45.
- Quesada Román, A. y Zamorano Orozco, J. J. (2018). Peligros Geomorfológicos en Costa Rica: Cuenca Alta del Río General. *Anuario Do Instituto de Geociencias*, 41(3), 239–251. [https://doi.org/10.11137/2018\\_3\\_239\\_251](https://doi.org/10.11137/2018_3_239_251)
- Quesada Román, A. y Zamorano Orozco, J. J. (2019). Zonificación de procesos de ladera e inundaciones a partir de un análisis morfométrico en la cuenca alta del río General, Costa Rica. *Investigaciones Geográficas*, (99). <https://doi.org/10.14350/rig.59843>
- Rodríguez Esteves, J. M. (2017). Los desastres recurrentes en México: El huracán Pauline y la tormenta Manuel en Acapulco, Guerrero. *Disertaciones. Anuario Electrónico Estudios de Comunicación Social*, 10(2), 133–152. <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/disertaciones/a.4778>
- (UNDRR), U. N. O. for D. R. R. (2017). *Disaster Risk Reduction Terminology*. Terminology on Disaster Risk Reduction. UNDRR.
- Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T. y Davis, I. (2014). At risk: natural hazards, peoples vulnerability and disasters. *At Risk: Natural Hazards Peoples Vulnerability and Disasters*, 1–471. <https://doi.org/10.4324/9780203714775>
- Zúñiga Tovar, Á. E. (2009). *Análisis del riesgo por inundaciones como consecuencia del desbordamiento del Río Yautepec, Morelos, México* [Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000650163>