



Geografía Aplicada

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
Volumen 1 . Número 1 . Enero .2025

ISSN: 3061-8436

Geografía Aplicada es una publicación de carácter semestral gestionada en el seno de la Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México. Es una revista científica arbitrada con especial interés en la publicación de artículos inéditos en el ámbito de la geografía humana, geografía física y la geografía ambiental, donde se apliquen procedimientos novedosos a la solución de problemáticas ambientales y socioeconómicas que confluyen en los territorios.

Geografía Aplicada
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
Volumen 1 ■ Número 1 ■ Enero ■ 2025
<https://geografiaaplicada.uaemex.mx/index>

Director editorial, Dr. Alexis Ordaz Hernández
Asistente editorial, Mtra. María del Carmen González Díaz
Corrección de estilo, Dr. Yered Gybram Canchola Pantoja
Diagramación, Lic. Diana Yered Gaona
email: geografiaaplicada@uaemex.mx

CINTILLO LEGAL

Geografía Aplicada, Vol. 1, Número 1, enero - junio 2025, es una publicación semestral editada por la Universidad Autónoma del Estado de México, Instituto Literario 100 Ote., Colonia Centro, Toluca Estado de México, C.P. 50100 Tel. (722) 2153666. <https://geografiaaplicada.uaemex.mx>, correo electrónico: geografiaaplicada@uaemex.mx. Editor responsable: Alexis Ordaz Hernández, Facultad de Geografía, Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2024-100313463600-102, ISSN: 3061-8436 ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derechos de Autor. Responsable de la última actualización de este Número, Alexis Ordaz Hernández, Facultad de Geografía, Cerro Coatepec s/n Ciudad Universitaria, Toluca Estado de México C.P. 50110, fecha de última modificación, 21 de enero de 2025

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación. Se autoriza la reproducción total o parcial de los textos aquí publicados siempre y cuando se cite la fuente completa y la dirección electrónica de la publicación.

Hecho en México, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM).

Esta página y sus contenidos pueden ser reproducidos con fines no lucrativos, siempre y cuando no se mutile, se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas 4.0 Internacional.

De otra forma, requiere permiso previo por escrito de la institución.



Universidad Autónoma del Estado de México.
Instituto Literario # 100 C.P. 50000 Col. Centro
(+52 722) 226 23 00
rectoria@uaemex.mx

SUMARIO

Análisis multiescalar del crecimiento de la Zona Metropolitana de Toluca Eduardo Jiménez López, Edel Cadena Vargas	1
Historicidad del uso del suelo de la antigua ciénaga del Chignahuapan, La Concepción Coatípac, Calimaya, México Armando Arriaga Rivera, José Emilio Baró Suárez	22
Panorama geológico de Temascaltepec: una contribución a la investigación con enfoque geográfico y ambiental Stefanni Guadalupe Ruíz Muñoz, Daniel Fernando Gómez Benítez	41
Análisis morfotectónico del territorio circundante a Tijuana, Baja California, México: aportes para la evaluación del peligro sísmico Juan Carlos Garatachia Ramírez, José Ramón Hernández Santana, Carlos Isidro Huerta López	79
Propuesta de un plan de ordenamiento territorial integral costero. Estudio de caso: Cazones de Herrera, Veracruz Daniel Morales Méndez, Ana María Gómez Viera	107
Origen, tendencias y desafíos de la geoconservación Luis Miguel Espinosa Rodríguez, Miguel Ángel Balderas Plata, Verónica Leticia Sámano Corrales, José Juan Cano Delgado	139
La población con discapacidad en el estado de Guerrero, México: un acercamiento desde la óptica de la vulnerabilidad y la exclusión social Neftalí García Castro, Yuridia Lozano Peñaloza	168
Riesgos siconaturales asociados a fallas geológicas, algunos casos del centro-sur de México Edgar Angeles Moreno, Isidro Loza Aguirre, Patricia Olvera Flores	197
La Geografía Aplicada en Mérida, Yucatán: una Herramienta para la Sostenibilidad y el Desarrollo Territorial Ayesa Martínez Serrano, Manuel Bollo Manent, Gustavo Martín Morales	240
Estimación de la amenaza por movimientos en masa en pequeños municipios andinos. Caso de estudio: San Sebastián, Cauca – Colombia Yesika Johanna Cansimanse Papamija, Jorge Andrés Vélez Correa	263

Análisis multiescalar del crecimiento de la Zona Metropolitana de Toluca

Multi-scale analysis of the growth of the Metropolitan Area of Toluca

Eduardo Jiménez López ¹ y Edel Cadena Vargas ^{2*}

¹ Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Población de la Universidad Autónoma del Estado de México, Cerro Coatepec s/n Ciudad Universitaria, Toluca Estado de México C.P. 50110, ejimenezl@uaemex.mx, <https://orcid.org/0000-0002-1883-3890>

² Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México, Cerro Coatepec s/n Ciudad Universitaria, Toluca Estado de México C.P. 50110, ecadenav@uaemex.mx, <https://orcid.org/0000-0002-3131-9597>

*Autor de correspondencia

Recibido: 15/11/2024. Aceptado: 23/12/2024. Publicado: 21/01/2025.

Cómo citar: Jiménez López, E., & Cadena Vargas, E. (2025). Análisis multiescalar del crecimiento de la Zona Metropolitana de Toluca. Geografía Aplicada, 1(1), 1-21. Consultado de <https://geografiaaplicada.uaemex.mx/article/view/25615>

Resumen

El objetivo de este trabajo es mostrar que el crecimiento urbano puede modelarse como un sistema dinámico no lineal, donde múltiples factores influyen en la evolución de la ciudad. Además de dividir el espacio para un mejor análisis de la expansión del área urbana por medio de Análisis Multiescalar, se agregan Autómatas Celulares con Filtro Inverso y Cadenas de Markov. Este modelo divide la imagen de la ciudad que es objeto de estudio en unidades territoriales rectangulares de iguales dimensiones. El modelo propuesto en este trabajo opera a través de reglas de transición y reglas de vecindad que son las instrucciones evolutivas de cada píxel y de la ciudad en general, por lo que se podría afirmar que son elementos de crecimiento de la ciudad. En la práctica, hay sectores de la ciudad que se expanden de manera diferente al conjunto. Tienen un patrón propio de expansión urbana, que responden a una mejor regla de transición, diferente a la que mejor replica la expansión del área urbana en su conjunto.

Palabras clave: Análisis Multiescalar, Autómata celular, Cadenas de Markov, Expansión Urbana, Filtro Inverso.

Abstract

The objective of this work is to show that urban growth can be modeled as a non-linear dynamic system, where multiple factors influence the evolution of the city. In addition to dividing the space for a better analysis of the expansion of the urban area through Multiscalar Analysis, Cellular Automata with Inverse Filters, and Markov Chains, this work adds these elements to the model. It divides the image of the city, which is the object of study, into rectangular territorial units of equal dimensions. The model proposed in this work operates through transition rules and neighborhood rules, which represent the urban evolutionary instructions of each pixel and of the city. Thus, it can be said that they constitute expansion factors of the city. In practice, there are sectors of the city that expand differently from the whole. These sectors have their own pattern of urban expansion, which

responds to a better transition rule, different from the one that best replicates the expansion of the urban area as a whole.

Keywords: Cellular Automata, Inverse Filter, Markov Chains, Multiscalar Analysis, Urban Expansion.

1. Introducción

El enfoque multiescalar trata de tener una visión integral del espacio de análisis en diferentes escalas o niveles. La escala es un factor que nos ayuda a analizar cómo la reducción del espacio impacta e interactúa con el medio. De acuerdo con la relación jerárquico-funcional que se da entre territorios a diferentes escalas, cada infraestructura se caracteriza por tener su propio nivel (Fang, 2021).

La auto semejanza o la autoorganización se pueden observar a través de reglas locales aplicadas en muchos casos o en reducción de espacio. El resultado es el surgimiento de un nuevo orden en un sistema a nivel local pero que aparece en todo el sistema. Este comportamiento se conoce como comportamiento Fractal (Song, 2005).

La utilidad de la idea fractal es que nos permite caracterizar las variaciones espaciales con bastante precisión y especificar lo que siempre se ha conocido pero que ha sido difícil de medir. También es importante saber cómo cambian los procesos para diferentes escalas de análisis (Halley, 2004).

En el estudio de las ciudades con este enfoque se da la posibilidad de explicar el crecimiento acelerado y el aparente comportamiento caótico. Al analizar con esta herramienta se puede demostrar que existe una geometría en su estructura interna que no se observa a simple vista, sino desde un punto más abstracto, multiescalar o autosimilitud (Li, 2004).

En este sentido, las ciudades en su crecimiento muestran un patrón muy similar al modelo de autómatas celulares, que caracterizan sistemas naturales dinámicos complejos que incluyen una amplia variedad de elementos idénticos, independientemente de su escala.

Esto se puede representar como una matriz de celdas o células en varias dimensiones, que tiene la posibilidad de tener un valor determinado. Los valores en estas celdas se modifican de manera sincrónica en intervalos de tiempo discretos, conforme a determinadas reglas de transición, que se implementan en cada punto de la matriz unidimensional. La regla de transición se establece por los valores previos de una vecindad de lugares que rodean la celda de interés (Altuntas, 2016). En estos sistemas, sugerimos la creación de celdas de una sola dimensión y una debajo de la otra. Descubriremos un patrón complejo, auto similar, originado a través de normas deterministas, que no se comprenden ni debaten, que solo se llevan a cabo en paralelo en todas las celdas de los autómatas celulares unidimensionales (Amigo, 2007).

Por lo tanto, nos topamos con una conducta complicada creada literalmente a ciegas, pero que refleja una complejidad que se presenta en numerosas ciudades y que resulta complicada de explicar con herramientas convencionales. Los autómatas celulares constituyen una aplicación muy interesante para obtener resultados concretos en la línea de la estadística espacial y las estructuras fractales para el control de comportamientos globales en la búsqueda de modelamientos más realistas para el campo de la difusión en el espacio (Bartumeus, 2008). Se puede decir que la estructura espacial urbana resulta del mecanismo de autoorganización o autosimilitud de sistemas complejos que encuentra que este fenómeno puede ser una aplicación altamente dúctil para encontrar los fundamentos básicos del comportamiento espacial y se presenta como una útil herramienta para los procesos de planificación de la ciudad (Fuenzalida, 2018).

En este estudio, se eligieron Autómatas Celulares (AC) vinculados a Cadenas de Markov (CM) para simular el crecimiento de una ciudad en función de los siguientes requisitos: capacidad de simulación dinámica, alta eficiencia con datos, calibración simple, capacidad de simular múltiples espacios basados en los datos obtenidos y tratando de determinar patrones complejos. La unión de los dos modelos tiene la capacidad de simular cambios en tramos determinados por el interés de conocer cómo crece la ciudad en un determinado

sector de la mancha urbana. El análisis de Markov no tiene en cuenta las causas del cambio de uso del suelo y es insensible al espacio. Sin embargo, CM-AC utilizando el enfoque CM simplifica la técnica de AC y considera explícitamente tanto el espacio como el cambio en el tiempo (Eastman, 2003).

El modelo CM-AC permite una simulación más completa del crecimiento de la ciudad en comparación con cada uno de los métodos por separado. Sin embargo, la calibración CM-AC se basa operativamente en un único período de tiempo, lo que dificulta la simulación de la dinámica global en una escala de tiempo. El método propuesto en este trabajo tiende a ser más simple cuando el crecimiento de la ciudad se observa a escalas más pequeñas dentro de la ciudad globalista. La información utilizada se genera, gestiona y analiza con ayuda de imágenes satelitales y sistemas de información geográfica (SIG). Proporciona una perspectiva única para analizar eventos y procesos que tienen lugar en el territorio, brindando información que debe ser precisa y detallada, de gran utilidad para apoyar la toma de decisiones que permita comprender las causas y mitigar los efectos adversos del crecimiento en las áreas urbanas principalmente (Xu, 2019).

Para la simulación de la expansión urbana, este trabajo se centra en el uso de datos de áreas urbanas urbanizadas extraídos mediante teledetección multiespectral (es decir, imágenes de satélite). Estos datos suponen una enorme carga de trabajo en teledetección a diferentes escalas, pocos estudios están dirigidos a analizar diferentes escalas que se comparen con todo el espacio de análisis. La comparación resulta de tener una regla de vecindad para el espacio pequeño y si esta determina el comportamiento global de todo el espacio, en nuestro caso la ciudad (Bushell, 2002).

Paralelamente, las nociones escalares son propias de los estudios geográficos, consideradas con cada vez más fuerza desde nuevos enfoques conceptuales como la multiescalaridad (Halbert, 2010). Su relevancia es completamente pertinente, dado que pueden aclarar conceptos e interpretaciones del espacio, cómo aumentan las construcciones en la ciudad

en una determinada región o área, que están estrechamente relacionados con la articulación de la ciudad como infraestructura y movilidad (Berberoglu, 2016).

En este trabajo integramos una forma de dividir el espacio que es un análisis multiescalar vinculado con CM-AC para simular y predecir la expansión urbana de la ciudad de Toluca durante la etapa de 2010 a 2030. Este modelo que integra varias técnicas de análisis aplicadas al espacio maneja el todo como un rompecabezas. Intentamos evaluar: (a) si la integración de un análisis multiescalar y CM mejorará su capacidad para analizar y pronosticar la CA, (b) si el modelo multiescalar CM-AC mejora o no el modelo de AC que integró por el filtro inverso; y (c) ¿Qué factores son los más importantes para la expansión urbana en el área de estudio?

Este trabajo resulta innovador en la rama de la geografía que aplica técnicas matemáticas lineales y no lineales para realizar simulaciones de cómo crece la ciudad y los posibles efectos que puede tener. Las metodologías utilizadas en este estudio con técnicas tradicionales de modelado de sistemas dinámicos son posibles y tienen muy buenos resultados. Esto proporciona una perspectiva más completa sobre la efectividad y novedad del enfoque propuesto.

Por todo lo anterior, se puede decir que el crecimiento urbano puede modelarse como un sistema dinámico no lineal, donde se suman y analizan múltiples factores que influyen en la evolución de la ciudad. Además, el enfoque multiescalar trabaja con un microscopio de la ciudad, donde la aplicación de técnicas como AC y CM puede capturar la complejidad no lineal del proceso de crecimiento urbano.

Este trabajo brindará información sobre qué tan eficiente es la visión de agregar modelos a los estudios del crecimiento urbano de la ciudad. Determinar la relevancia de dividir el espacio y encuentre la tendencia de crecimiento con la ayuda de CM en cada espacio de análisis. El modelo AC se prueba y valida sólidamente utilizando el filtro inverso después de determinar la tendencia de crecimiento para cada espacio. Comprueba si este modelo

detallado se puede replicar fácilmente en otros estudios. Se valida si la expansión urbana se modela de manera más estricta y realista para evitar tendencias infladas mediante la incorporación de más herramientas.

2. Metodología

Se desarrolla una propuesta compuesta por CM-AC-Multiescalar para simular la expansión urbana en Toluca, México. El modelo combina las ventajas del modelo de Markov en la predicción del cambio cuantitativo, el modelo AC en la simulación de cambios en el espacio de sistemas complejos como la ciudad y la ventaja del análisis multiescalar. En el análisis del crecimiento de la mancha urbana reduciendo los espacios de análisis o de menor escala respecto al original. Por lo tanto, intentamos mejorar la precisión de la simulación del patrón de expansión de la expansión urbana en el pronóstico de cantidad en un área determinada (Figura 1).

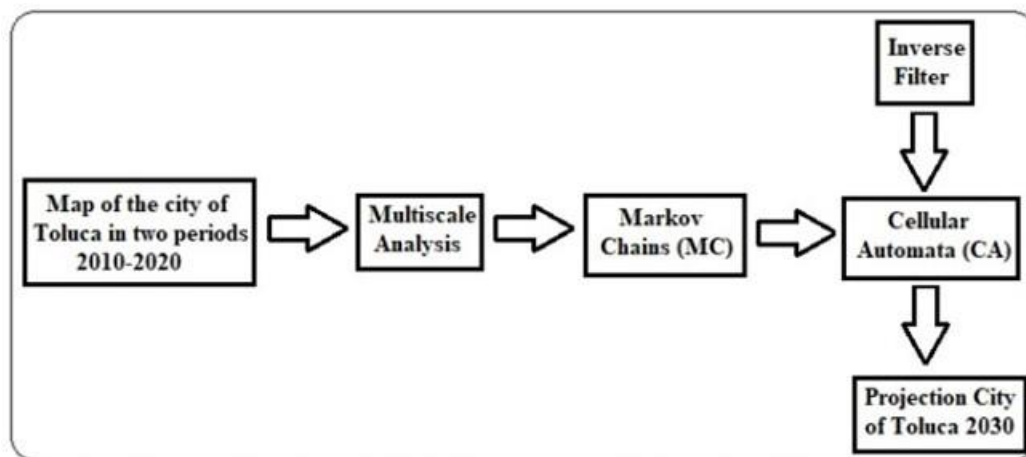


Figura 1. Elementos principales de CM-AC-Multiescalar.

Fuente: elaboración propia.

La propuesta del modelo CM-AC-Multiescalar proyecta el aumento de la mancha urbana y solo requieren de datos o mapas binarios del período de análisis para hacer una proyección.

El mapa en formato ráster se codifica/filtra con 1's en el terreno ocupado y 0's en el terreno desocupado en la mancha de la ciudad que estamos estudiando.

2.1. Análisis Multiescalar

La aportación del análisis multiescalar es dividir la totalidad del espacio de análisis, permite obtener visiones de diversas situaciones territoriales, al mismo tiempo que focaliza cuestiones más concretas que afectan espacios circunscritos o reducidos. Así, es posible generar modelos específicos para diferentes espacios intraurbanos, que muy probablemente tendrán distintos potenciales de transición y una huella característica de las vecindades en cada espacio.

Encontramos disponibles mapas del área urbana de la ciudad de Toluca de los años 2010 y 2020. Con esta información se divide el espacio de análisis como mejor le convenga al usuario, en una primera aproximación se divide cada lado de la imagen por la mitad aritmética, o la imagen se divide en ancho o largo por la mitad de los píxeles que contiene. Teniendo ya la división en cuatro. Numeramos en sentido antihorario, como se muestra en la figura 2 a.

En un plano bidimensional como es nuestro caso porque tiene largo y ancho. Si lo dividimos entre su largo y ancho obtenemos 4 planos como se muestra en la figura 2 c y d. De esta manera se puede decir que la duplicación se produce a una tasa exponencial de 2, 4, 8 y así sucesivamente.

Esta división nos llevará a analizar el espacio en espacios más pequeños donde cada uno de ellos tendrá una regla de vecindad para determinar su crecimiento. Tomamos como ejemplo el cuadrante IV de la figura 2 a, que es la Imagen real de la ciudad de Toluca en el año 2010, el tamaño de los cuadrantes será 1000000×1750000 píxeles. Tomando el

cuadrante IV de la imagen de la ciudad de Toluca en 2020, como se muestra en la Figura 2 b. Hay dos espacios más pequeños para analizar. Cabe señalar que la división del espacio depende del análisis que se quiera realizar en cada región. Tomamos en cuenta que debe ser la misma posición de análisis para realizar una proyección en el tiempo con ayuda de CM.

2.2. Cadenas de Markov

Las CM muestra transiciones de un estado a otro en un número limitado de estados posibles. Es la forma más útil de modelar procesos estocásticos y la evolución de la probabilidad cuando sólo se conoce la situación actual. La expansión de la mancha urbana y muchos otros fenómenos que se pueden observar con el paso del tiempo están modelados a través de procesos estocásticos, como cualquier conjunto de variables aleatorias $X(t)$ que están vinculadas al tiempo t (Jiménez-López, 2019).

Las CM es un proceso estocástico que posee la propiedad Markoviana cuando la condicionalidad de cualquier suceso futuro t_1 , es independiente del suceso anterior, solo se basa en el estado presente del proceso. Con esta técnica de proyección, el proceso carece de memoria. Para todos los estados y para todos los números enteros $n \geq 0$ se aplica la ecuación 1.

$$P(X_{(n+1)} = j | X_n = i, X_{(n-1)} = i_{(n-1)}, \dots, X_0 = i_0) = P(X_{(n+1)} = j | X_n = i) \quad (1)$$

El procedimiento se encuentra en el estado i en el momento n . Es un proceso estocástico discreto con espacio de estados $E = \{i, j, k, \dots\}$. Si el sistema está en el estado i en el instante t , debe estar en 1 de los estados en $t + n$, la probabilidad de transferencia depende no sólo del estado, sino también del momento en que se produce la transición. (es decir, la probabilidad es independiente del tiempo). Para todo i y n se deben cumplir las condiciones de Markov, en la matriz de transición, la suma de los porcentajes en cada fila debe ser igual a 1 y la probabilidad condicional debe ser no negativa (Jiménez-López, 2019).

El método de CM tiene en cuenta las variaciones temporales de las probabilidades, pero no las variaciones espaciales, con esto, la imagen en t se utiliza para aplicar las probabilidades de transferencia y agregar una regla determinista al AC para determinar espacialmente los píxeles. Cuentan con mayores probabilidades de modificar en cada categoría. Con este proceso, es probable que los cambios se basen en el contacto con cada píxel (p. ej. contacto con vecinos cercanos). Así se genera la metodología MC-CA-Multiescalar, la cual se encuentra bien sustentada en el tiempo y el espacio.

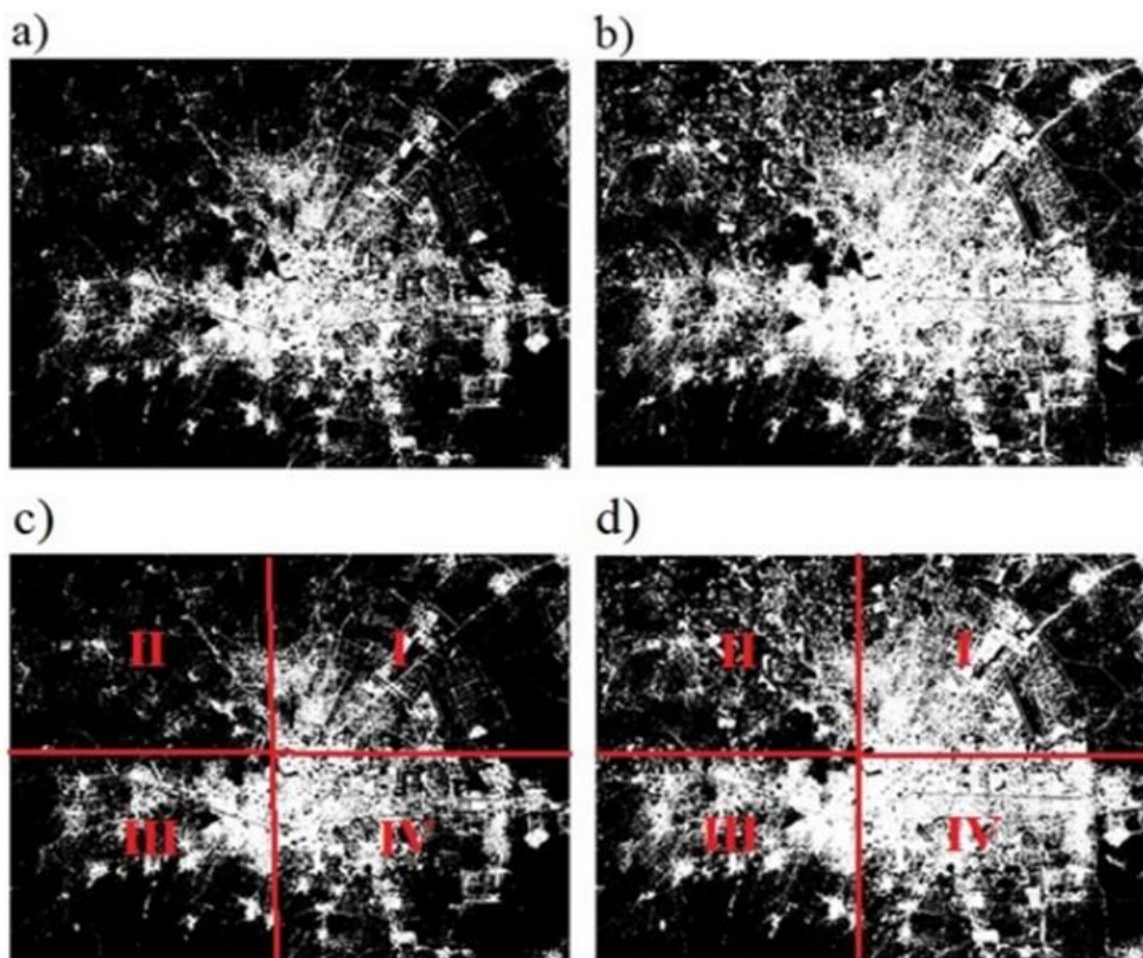


Figura 2. Mapas de la ciudad de Toluca 2010 a). 2020 b). División escalar Toluca 2010 c). 2020 d).

Fuente: elaboración propia.

2.3. Autómatas Celulares

Los procesos en el territorio se modelan con AC que concibe el espacio como una cuadrícula regular delimitada en varias dimensiones (Batty, 2007). Los AC se componen de cuatro propiedades relacionadas con sus elementos básicos: Adyacencia, que se refiere a las ubicaciones de las celdas en cualquier espacio dimensional, registran relaciones de proximidad-distancia entre ellas. El Estado en AC es el valor que toma la celda, célula o píxel entre dos valores únicos, cero o uno, cada celda tiene un estado en un conjunto posible, en un determinado punto del tiempo. La Influencia Espacial implica que el estado de las celdas depende de los estados y configuraciones de otras celdas, especialmente de las más cercanas. Las Reglas de Transición son las instrucciones que impulsan los cambios de estado en cada celda en el tiempo y el espacio (Batty, 2007; Garrocho et al., 2021).

Con estas definiciones, el AC se toma como una disposición uniforme, similar a un arreglo homogéneo, en cuadrícula, generalmente infinito, compuesto por objetos similares conocidos como celdas. Este conjunto puede tener una dimensión n , pero para fines de simulación de sistemas se implementa en dos dimensiones para nuestro trabajo (Jiménez-López et al., 2021). El AC es un modelo matemático que se puede definir por la tupla y se define como no lineal en la ecuación 2.

$$\gamma = (d, S, H, \delta) \quad (2)$$

Donde, d representa el espacio n -dimensional, S el conjunto de estados, H el espacio de vecindad y δ las reglas de transición. Los modelos basados en AC son sencillos de integrar con otras técnicas, métodos y modelos, con el objetivo de potenciar las habilidades de simulación en aplicaciones concretas (Li y Yeh, 2004; Gounaridis et al., 2019). En este trabajo, en una parte, se adhieren a modelos matemáticos desarrollados, como CM (Jiménez-López, 2019), que es un método que fortalece a AC.

2.4. Filtro Inverso

En los AC, incluir diversa información en las reglas de transición, la cual consiste en potenciar su habilidad para ilustrar la complejidad de la expansión urbana a diversas escalas de tiempo y espacio (Liu et al., 2021; Jiménez-López, 2022). Implementamos un método llamado filtro inverso con el objetivo de emular la expansión de la mancha urbana en el periodo 2010-2020 en la ciudad de Toluca, tomando en cuenta más información que la gestionada en los modelos de AC. En específico, tomando en cuenta diferentes dimensiones de la zona urbana que pueden estar desordenada en la ciudad. Para encontrar la mejor regla de transición o vecindad que determine la dinámica de un área delimitada.

Las áreas de análisis pueden ser grandes o pequeñas dependiendo del interés y con ello determinar si la mejor regla de vecindad para un área pequeña es la misma para todo el espacio. La mejor regla de vecindad se encuentra con el Filtro Inverso que consiste en determinar una regla AC óptima, El filtro equilibra la distancia entre el centro y los elementos de los resultados métricos para cada regla AC, produciendo formas simétricas. De tal manera que al final de los cálculos se obtiene una matriz de métricas (Jiménez-López, 2022).

El componente principal del filtro inverso es encontrar la distancia de Mahalanobis que determina la misma distribución de probabilidad para las métricas de ajuste utilizadas en este trabajo. Como estas, la entropía de Shannon, la dimensión fractal, el índice de Jaccard y el índice Kappa. Con los indicadores se crea una matriz **A**, calculamos un centro **C**, que se obtiene del promedio de cada indicador y se forma la columna x_i , generando un vector de métricas promedio. Se realiza con la matriz de covarianza ζ está definida por la ecuación 3.

$$d_m(\vec{x}, \vec{y}) = \sqrt{(\vec{x}, \vec{y})^T \zeta^{-1} (\vec{x}, \vec{y})} \quad (3)$$

Donde, d_m es la distancia de Mahalanobis entre el centro (i.e el promedio de los valores obtenidos de las métricas) y los vectores que componen la matriz métrica **A**. Los valores de la matriz **A** son los valores de las mediciones con las métricas de ajuste. Con esta técnica de

análisis propuesta se cumplen dos propósitos, uno de ellos es determinar la mejor regla de vecindad que genera el AC y la segunda determinar el menor error posible inherente a las simulaciones.

2.5. Entropía

Es una medida de dispersión en la que el valor binario de los mapas se distribuye sobre áreas espaciales. Si el índice tiene un valor de 1, el valor de la variable está distribuido uniformemente. Si tiene un valor de 0, las variables están concentradas (Ecuación 4).

$$E_n = \frac{\sum_{i=1}^n p_i \log(1/p_i)}{\log(n)} \quad (4)$$

Donde, E_n representa la entropía, p_i representa la probabilidad de hallar la variable n en alguna de las zonas. El valor de la entropía nos da un valor cuantificable de la concentración y dispersión de las construcciones en la ciudad. Si hay valores cercanos a 0 nos dice que la ciudad está demasiado concentrada en zonas concretas y si es cercano a 1 nos dice que la ciudad se dispersa correctamente.

2.6. Dimensión fractal

La dimensión fractal en este trabajo se considera como una medida de crecimiento. Las medidas de la dimensión euclidiana son $D = 1$ es una línea y $D = 2$ es un plano sólido. En esta propuesta la dimensión está contenida entre uno y dos. Si la dimensión es cercana a dos se puede decir que tiene muchos puntos cubriendo el espacio (i.e. crecimiento) y si está cercana a uno no tiene ausencia de puntos y se acerca a una línea (i.e. decrecimiento).

El cálculo de D se fundamenta en la medición correspondiente del número de píxeles negros que envuelven un conjunto específico. En la mancha urbana como lo hemos manejado el mapa lo consideramos como una malla de cuadrados de tamaño r para contar cuántos de estos cuadrados son necesarios para cubrir el área urbana construida. Se denota $N(r)$ a

dicho número de cuadrados, que depende del tamaño r . Es muy complicado realizar ese cálculo de los cuadros o pixeles ocupados, se aproximarlos después de realizar varias mediciones con mallas tan estrechas como sea posible y se utiliza la ecuación 5 para aproximarlos y obtener la medida de la dimensión.

$$D = \frac{\log(N(r))}{\log(1/r)} \quad (5)$$

2.7. Índice Jaccard

El índice I_j muestra la similitud entre dos imágenes de mapas. En el índice Jaccard, cuando su resultado es cercano a 1, muestra la igualdad de los mapas en valor y posición. Si el valor es cercano a 0, los mapas son desiguales en valor y en posición del pixel. El índice se obtiene con la ecuación 6.

$$I_j = \frac{F_{11}}{F_{21} + F_{12} + F_{11}} \quad (6)$$

El índice es fácil de analizar con la teoría de conjuntos. El índice de Jaccard calcula dos aspectos clave para comparar mapas: igualdad entre datos ráster y su ubicación en un mapa.

2.8. Índice Kappa de Cohen

El índice k es una medida comparativa entre las imágenes de mapas binarios, el índice puede tomar valores entre 0 y 1. Si el valor del índice obtenido es cercano a 1, el grado de igualdad entre los mapas es mayor, mientras que si es cercano a 0, la desigualdad es mayor (Ecuación 7).

$$k = \frac{E_0 - E_e}{1 - E_e} \quad (7)$$

Donde, E_0 es la relación de similitud observada, E_e es la similitud de igualdad esperada y $1 - E_e$ representa el mayor grado de igualdad o acuerdo.

2.9. Fuente de datos

Los datos de cobertura del suelo se obtuvieron a partir de la base de datos del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), que incluye mapas de la región urbana de la ciudad de Toluca, incluyendo la zona urbana del valle de Toluca (ver Figura 2), en el periodo disponible para 2010/11 y 2020/21. Se utilizaron imágenes de alta resolución, los datos que podemos llamar auxiliares para este estudio incluyen factores físicos (i.e. pendientes), factores de infraestructura (i.e. equipamiento urbano), redes viales (i.e. calles, vías urbanas primarias y secundarias) y factores de desarrollo (i.e. áreas restringidas para la construcción). La mayoría de los datos son estáticos y permanecen sin cambios durante el periodo de modelación.

El territorio de investigación es la región metropolitana de Toluca (i.e. Mancha Urbana de Toluca), ubicada a 45 kilómetros de la Ciudad de México. En las últimas décadas, Toluca ha experimentado un rápido desarrollo, evolucionando de poco más de 800 mil residentes a comienzos del siglo XXI, a más de 1.2 millones de personas en 2020 (INEGI, 2021). En 2010, la ciudad comprendía 16 mil 500 hectáreas y para 2020, ya contaba con cerca de 30 mil.

3. Resultados

El mapa binario de 2010 contiene información en el tiempo t_0 , mientras que la información del mapa binario de 2020 se refiere a la información en el tiempo t . Con estos datos se efectúa un recuento de ceros y unos, los cuales se reúnen para crear una matriz transicional (P). Con la determinación de esta matriz P_n se obtienen las mediciones en el tiempo, se realizan en un análisis espacial con AC y la búsqueda de la mejor regla con el Filtro Inverso.

Cuando se utiliza el modelo CM-AC-Multiescalar para realizar proyecciones, se utiliza la mejor regla encontrada con el filtro inverso para reflejar el desarrollo o transformación de los estados en la matriz de transición, se utiliza la matriz de transición para representar el crecimiento o transformación de los estados. La mejor regla encontrada define que un píxel

posee una mayor posibilidad de modificar su categoría o estado debido a la configuración-contacto con los píxeles vecinos.

Los datos de entrada constan de dos mapas binarios en diferentes momentos (por ejemplo, con los mapas en t_0 y t). Con base en estos datos se realiza una división de los mapas, la primera división que es la base de la propuesta que hicimos, se divide el espacio en cuatro regiones como se muestra en la Figura 2 a) y b), (es decir, cada una corresponde a un cuadrante del plano cartesiano). Los cuadrantes tienen un tamaño de 2000000×2500000 píxeles, donde se lleva a cabo un conteo binario que estableció los cimientos para crear una matriz transicional. Se logró una nueva matriz de transición mediante la metodología CM, que representa la proyección de los datos, se llevó a cabo la simulación espacial utilizando AC. Se tomaron los valores que pasaron de cero a uno, junto con los que se mantuvieron en uno, y se implementaron el AC con zonas limitadas por la probabilidad de transición encontrada y también con la mejor regla en la sección del mapa en t , que genera el nuevo mapa en el tiempo t_1 , que es la proyección en la ciudad de Toluca en el año 2030 (Figura 3).

Para ejemplificar lo propuesto en este trabajo se toma el cuadrante IV, mostrado en la Figura 2 c) y d) en los dos tiempos de análisis. Con la proyección de la ciudad de Toluca para el 2020 realizamos un banco de pruebas que encuentra la mejor regla de proyección, con la cual realizamos la proyección al 2030. Esta regla de vecindad se encuentra de manera muy eficiente comparando el mapa real y el simulado para en el área de análisis de la ciudad de Toluca en 2020 con el Filtro inverso podemos ver qué tan eficiente es el método de distribución de píxeles. También es un método generado por este equipo de trabajo incluido en AC, que trata la distribución de píxeles de forma Aleatoria, así como el crecimiento de la ciudad y que muchos autores llaman la ciudad compleja. Los mejores valores en el cuadrante IV son los siguientes, el valor de la entropía de Shannon es 0.95, la dimensión fractal 0.94, índice de Jaccard 0.95 y el índice Kappa es 0.85.

La metodología propuesta de combinación CM-AC-Multiescalar y Filtro es altamente eficaz y presenta resultados destacables, podemos crear una proyección en un cuadrante de la ciudad de Toluca para el año 2030 con la mejor regla que es 119. Es posible afirmar que durante un lapso de 20 años, la tasa de crecimiento de Toluca sigue manteniendo una tendencia logarítmica, como lo demuestra el crecimiento de CM.

En la simulación realizada para 2030 en el cuadrante IV abarca 1262 hectáreas. Un incremento de 427 hectáreas, lo que implica que se prevé que la ciudad aumente casi un 34% en comparación con 2020. La expansión de los 10 años precedentes (2010 a 2020) tuvo una velocidad de crecimiento similar. El modelo trabaja con un crecimiento tendencial, es importante saber dónde crecerá la ciudad y que potencial de transición tiene cada espacio de análisis. Es muy importante resaltar que estos modelos encuentran los factores que más contribuyen al crecimiento de la mancha urbana y se debe resaltar la técnica de análisis multiescalar poco utilizada en este tipo de trabajos.

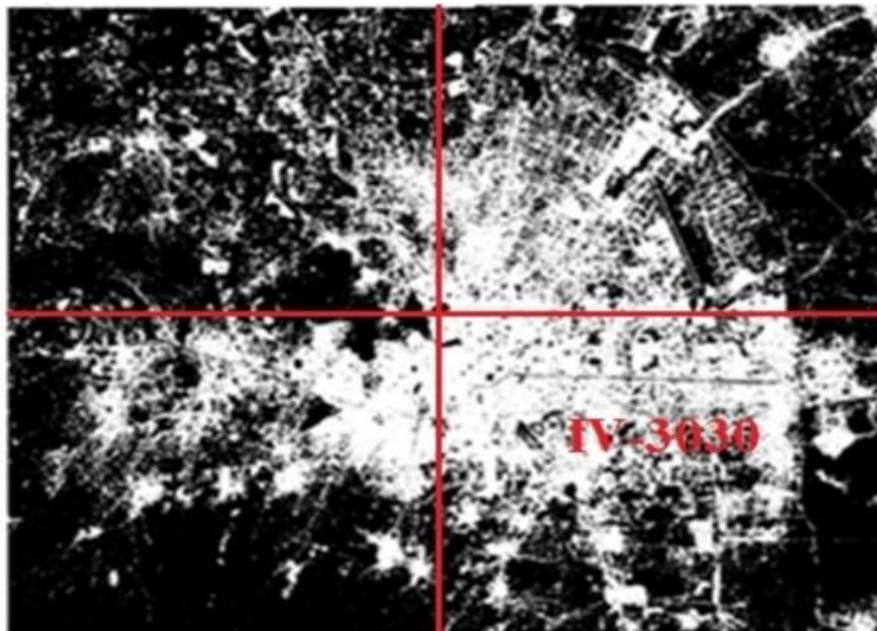


Figura 3. Simulación del crecimiento de la ciudad de Toluca 2030.

Fuente: elaboración propia.

En la figura 3, el cuadrante IV muestra las zonas de crecimiento en la ZMT. En la periferia sureste de esta zona como ejemplo en Metepec, San Mateo Atenco, Ocoyoaca, San Miguel Totocuitlapilco, podemos ver qué tan eficiente es el método de distribución de píxeles. Con esto podemos determinar que el modelo propuesto de combinar Análisis Multiescalar, CM, AC y Filtro inverso es muy eficiente y tiene muy buenos resultados. La Figura 3 es una imagen que presenta un balance en los valores que pasaron de uno a cero y en el otro sentido, por lo tanto, se puede afirmar que, durante un lapso de 10 años, el ritmo de crecimiento de la ciudad de Toluca sigue una tendencia logarítmica ascendente.

5. Conclusiones

Este trabajo proporcionó una metodología para analizar el desarrollo de la mancha urbana en Toluca con la unión de diferentes técnicas: Análisis Multiescala, CM, AC y Filtro Inverso. La función de estas técnicas nos ayuda en la proyección de crecimiento de la ciudad de Toluca, la cual tiene una tasa de crecimiento muy alta por ser una ciudad con más de un millón de habitantes. Proporciona datos útiles y una perspectiva distinta al método convencional de crecimiento con potencial de transición en secciones del mapa en estudio, enfocándose principalmente en el crecimiento de la mancha urbana con diferentes factores que contribuyen o no contribuyen al crecimiento.

Lo más destacable del modelo es el análisis de la división-temporal-espacio, muy complicado de localizar métodos que proyectan mapas o que llevan a cabo cálculos en el crecimiento de ciudades. La tendencia en las proyecciones de los píxeles ocupados nos lleva a un análisis en el tiempo y CM. El espacio con la mejor regla de vecindad encontrada por AC y el filtro inverso.

Las técnicas de comparación cartográfica y el concepto de comparación-posición en la mancha urbana nos impulsa a utilizar comparadores estadísticos, tales como el Índice Kappa de Cohen y el Índice Jaccard. La comparación de mapas y la creación de índices demuestran cuán eficaz es el modelo. La única variable que carece de control es la adquisición de los

mapas para el análisis, todo se basa en mantener las mismas condiciones de captura durante la toma de escala y la división. Este trabajo nos conduce a investigar métodos escasamente empleados en la investigación cartográfica: la dimensión fractal y la entropía de Shannon, cuyo uso ha sido relevante para ilustrar el crecimiento-difusión de la expansión urbana.

Las técnicas tradicionales de modelado de sistemas dinámicos, como los modelos de regresión lineal o los modelos de series de tiempo, pueden diferir significativamente del enfoque propuesto en términos de la capacidad de capturar la complejidad y la no linealidad del crecimiento urbano. Es útil discutir estas diferencias, cómo afectan la validez y utilidad de los resultados obtenidos, pero lo dejamos para trabajos futuros.

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

6. Referencias

Altuntas, S.; Dereli, T.; Kusiak, A. (2016). Assessment of corporate innovation capability with a data-mining approach: industrial case studies. *Computers and Industrial Engineering*, 102, pp. 58--68.

Batty, M. (2007). Planning support systems: progress, predictions, and speculations on the shape of things to come. *UCL Working Papers Series*, 1, pp. 1--26.

Berberoglu, S.; Akin, A.; Clarke, K. (2016). Cellular automata modeling approaches to forecast urban growth for adana, Turkey: A comparative approach. *The Planning Review*, 153, pp. 11--27.

Bushell, G.; Yan, Y.; Woodfield, D.; Raper, J.; Amal, R. (2002). On techniques for the measurement of the mass fractal dimension of aggregates. *Advances in Colloid and Interface Science*, 95, pp. 1--50.

Bartumeus, F.; Levin, S. (2008). Fractal reorientation clocks: Linking animal behavior to statistical patterns of search. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105 (49), pp. 19072--19077.

Fang, C.; He, S.; Wang, L. (2021). Spatial characterization of urban vitality and the association with various street network metrics from the multi-scalar perspective. *Frontiers in Public Health*, 9, pp. 677--910.

Fuenzalida, M.; Buzai, G.; Moreno Jiménez, A.; García de León, A. (2018). Geografía, geotecnología y análisis espacial: tendencias, métodos y aplicaciones. In *Análisis Espacial*; Repositorio Institucional CONICET Digital: Godoy Cruz, Argentina, pp. 1--213.

Garrocho, C.; Chavez, T.; Jiménez-López, E. (2021). Autómata Celular Metro-nasz: laboratorio experimental de expansión urbana. *La situación demográfica de México 2021*, 3, (3), pp. 149--175.

Gounaridis, D.; Chorianopoulos, I.; Symeonakis, E.; Koukoulas, S. (2019). A Random Forest-Cellular Automata modelling approach to explore future land use cover change in Attica (Greece), under different socio-economic realities and scales. *Science of the Total Environment*, 464, pp. 320--335.

Harvey, F. (2015). *A primer of GIS: Fundamental geographic and cartographic concepts*. Guilford Publications.

INEGI, 2021. Comunicado de Prensa 55/21, 26 de enero de 2021. Dirección Regional Centro Sur / Coordinación Estatal México. Toluca, Estado de México. 2021.

Jiménez-López, E. (2019). Cadenas de Markov espaciales para simular el crecimiento del Área Metropolitana de Toluca, 2017-2031. *Economía, sociedad y territorio*, 19, (60), pp. 109--140.

Jiménez-López, E.; Garrocho C.; Chávez T. (2021). Autómatas Celulares en Cascada para modelar la expansión urbana con áreas restringidas. *Estudios demográficos y urbanos*, 36, (3), pp. 779--823.

Jiménez-López, E. (2022). Inverse Filter in the Growth of Urban Sprawl with Cellular Automata Model. In *Complex Systems and Their Applications: Second International Conference (EDIESCA 2021)*, 1, pp. 231--247.

Li, X.; Gar-On Yeh, A. (2004). Data mining of cellular automata's transition rules. *International Journal of Geographical Information Science*, 18 (5), pp. 723--744.

Liu, Y.; Batty, M.; Wang, S.; Corcoran, J. (2021). Modelling urban change with cellular automata: Contemporary issues and future research directions. *Progress in Human Geography*, 45, pp. 3--24.

Majumdar, S; Mounaix, P.; Sabhapandit, S.; Schehr, G. (2021). Record statistics for random walks and Lévy flights with resetting. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 55(3), pp. 034002.

Serafino, M.; Cimini, G.; Maritan, A.; Rinaldo, A.; Suweis, S.; Banavar, J.; Caldarelli, G. (2021). True scale-free networks hidden by finite size effects. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(2), e2013825118.

Xu, T.; Gao, J. (2019). Directional multi-scale analysis and simulation of urban expansion in Auckland, New Zealand using logistic cellular automata. *Computers, Environment and Urban Systems*, 78, pp. 101390.

Yeh, A.; Li, X.; Xia, C. (2021). Cellular automata modeling for urban and regional planning. *Urban informatics*, pp. 865-883. Book Serie.

Historicidad del uso del suelo de la antigua ciénaga del Chignahuapan, La Concepción Coatípac, Calimaya, México

Land use historicity of the ancient Chignahuapan swamp, La Concepción Coatípac, Calimaya, Mexico

Armando Arriaga Rivera ^{1*}, José Emilio Baró Suárez ²

¹ Sociedad Hijos de Calimaya, A.C. (CONAHCYT-RENIECYT), Calimaya, Estado de México, C.P. 52200, arriaga_argec@yahoo.com.mx, <https://orcid.org/0000-0002-9622-8119>

² Facultad de Geografía, Universidad Autónoma de Estado de México, Cerro de Coatepec s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 50110 Toluca, Estado de México y jebaros@uaemex.mx, <https://orcid.org/0000-0003-2514-8709>

*Autor de correspondencia

Recibido: 22/11/2024. Aceptado: 05/01/2025. Publicado: 21/01/2025.

Cómo citar: Arriaga Rivera, A., & Baró Suárez, J. (2025). Historicidad del uso del suelo de la antigua ciénaga del Chignahuapan, La Concepción Coatípac, Calimaya, México. *Geografía Aplicada*, 1(1), 22-40. Consultado de <https://geografiaaplicada.uaemex.mx/article/view/25616>

Resumen

El trabajo tiene como objetivo mostrar las transformaciones en el uso del suelo e impacto ambiental y territorial en la antigua ciénaga del Chignahuapan del municipio de Calimaya. La investigación, favorece el acompañamiento en la toma de decisiones para el desarrollo urbano y territorial. Además, facilita el uso racional y sostenible de los activos ambientales. El método aplicado es la periodización siendo una herramienta y técnica metodológica de la historiografía que permitió definir etapas históricas según las características del estudio, con la finalidad de analizar la dinámica del uso del suelo a través del tiempo, para explicar sus cambios en la Delegación de la Concepción Coatípac desde el siglo XVI hasta el siglo XXI.

Palabras clave: Cambio de uso del suelo, Laguna de Chignahuapan, Municipio de Calimaya.

Abstract

This work aims to show the transformations in land use and its environmental and territorial impact on the former *Chignahuapan* swamp, so that it can support decision-making in urban and territorial development, facilitating a rational and sustainable use of environmental assets. The method applied is periodization, which is a methodological tool and technique of historiography that allowed historical stages to be identified, according to the characteristics of the study, in order to analyze the dynamics of land use over time and explain the changes that land use has undergone in the Delegation of *Concepción Coatípac*, from the 16th to the 21st century, as well as its environmental and territorial impact.

Keywords: *Calimaya* municipality, Change in land use, *Chignahuapan* swamp.

1. Introducción

La delegación de La Concepción Coatípac, se ubica al oriente del municipio de Calimaya y en la zona baja del valle de Toluca. Una de las actividades económicas que realizaban los habitantes de esta localidad era la pesca, ya que su medio natural y lacustre, se los permitía. Sin embargo, poco se ha hecho por la preservación de estas actividades (Figura 1).



Figura 1. Ubicación geográfica del Estado de México en la República Mexicana.

Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2024).

La actividad principal de los habitantes de Coatípac era la recolección de los productos de la laguna y pastura para las cabezas de ganado mayor que poseían. Posteriormente en el siglo XX, se hace énfasis en las incidencias de la Revolución en la localidad; el reparto agrario benefició a sus habitantes al dotarlos de ejido. La introducción de los servicios (agua potable, energía eléctrica y drenaje); sobre todo, el cambio de actividad económica, que trajo consigo la desecación de la zona lacustre del río Lerma, algunas personas que dependían de la caza de aves lacustres y de la pesca, se tuvieron que dedicar a la agricultura y como actividad complementaria a tejer la palma para elaborar cestas y otros productos relacionados. Otros se emplearon como obreros en la zona industrial de Toluca. Los pobladores de Coatípac, también se han dedicado al comercio y a la arriería antes del uso de los camiones de carga.

El valle de Toluca, con su rica variedad natural y con suelos regados por varios ríos, entre los que resaltan el Río Lerma y el Temascaltepec, ha sido testigo de la fundación de varios pueblos a lo largo del tiempo y que en la actualidad proveen de agua a localidades cercanas,

entre ellas el municipio de Calimaya, ubicado en las faldas del volcán (Loera Chávez y García, 1999) (Figuras 2 y 3).

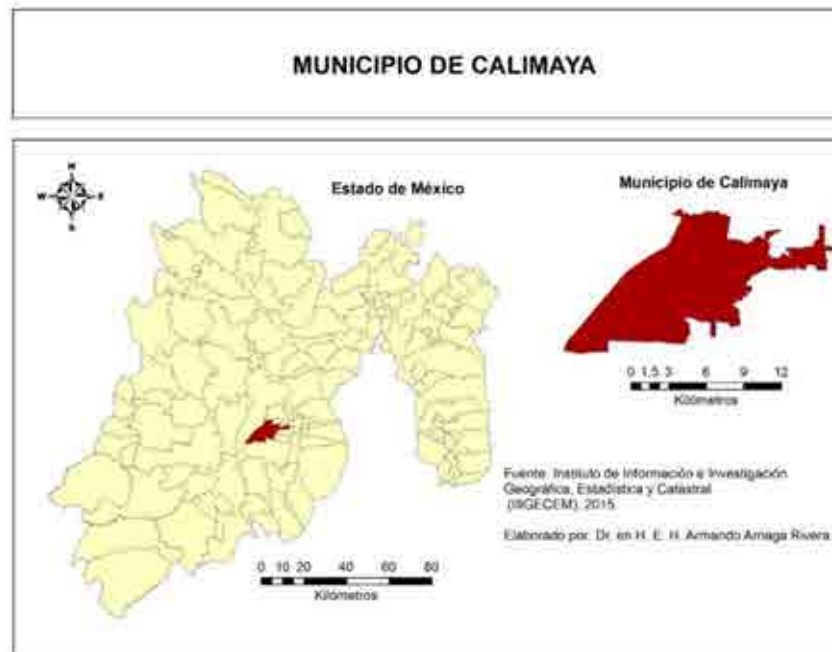


Figura 2. Ubicación geográfica del municipio de Calimaya en el Estado de México.

Fuente: Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral (IIIGECM) (2015).

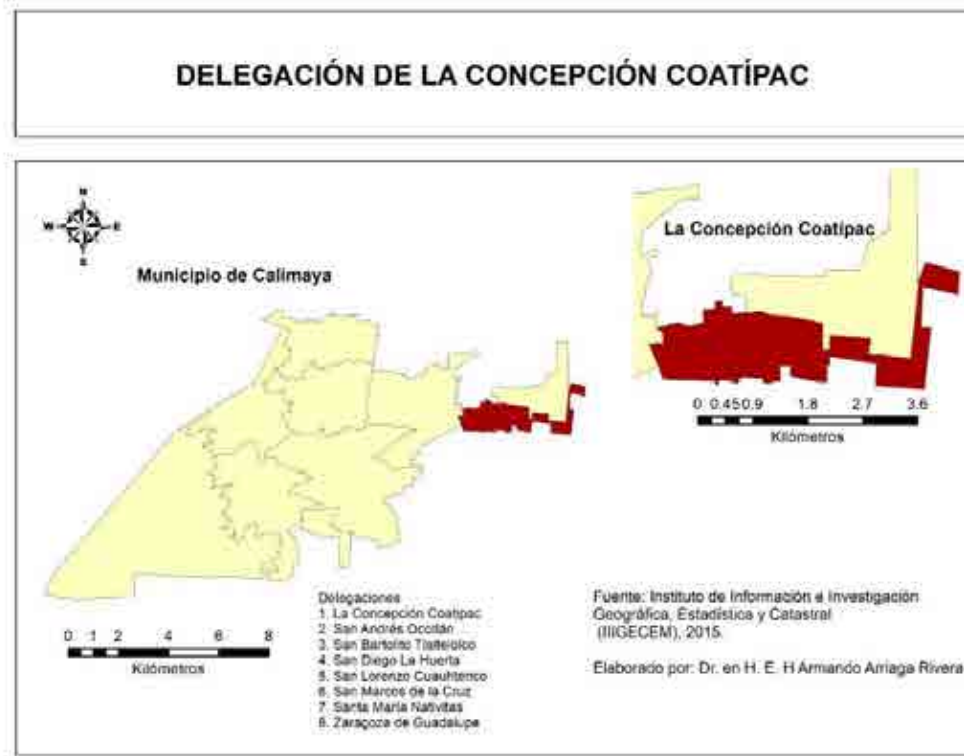


Figura 3. Ubicación geográfica de la delegación de La Concepción Coatípac, municipio de Calimaya.

Fuente: Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral (IIIGECM) (2015).

Nota: La información proporcionada sólo es de carácter técnico, por lo que no constituye resolución en materia de límites, por lo que el presente documento es de carácter enunciativo.

2. Metodología

La periodización constituye una herramienta y técnica metodológica de la historiografía, permite definir etapas históricas de una manera adecuada. La fundamentación que sustenta las bases y lineamientos científicos para este trabajo es planteada por Collazo (2012) quien también se basó en Carlos Rama, siendo cinco principios:

1. Se tiene que atender a la unidad interior del propio período.
2. La necesidad de deducir el período del objeto de estudio de los hechos históricos mismos o de las concepciones de la época que abarca.

3. Los períodos deben tener aplicación universal.
4. Los períodos deben vincularse con la totalidad del tiempo histórico a estudiar.
5. El conjunto de todos los períodos elaborados debe cubrir la totalidad del tiempo histórico, es decir, no dejando espacios.

Asimismo, Fernand Braudel señala que, la periodización se considera un modo de ordenamiento del conocimiento sobre el pasado, ya que considera las etapas históricas como construcciones analíticas elaboradas desde el presente en el que se producen y por lo tanto pesan sobre ellas necesidades políticas, sociales, cognitivas. Por lo tanto, estos esquemas se elaboran a partir de interpretaciones particulares, pues asignan un modelo a los procesos sociales a partir del cual se desprenden razonamientos para hacer cortes temporales a estas etapas sobre el mismo proceso histórico, determinando épocas, periodos, subperiodos, eras, etcétera (Hernández, *et al.*, 2024).

3. Resultados

Dentro de los resultados es importante hacer mención sobre las etapas históricas de esta delegación dentro de la historia nacional mexicana y como dentro de su espacio local desarrolla una vida cotidiana, muy singular que se diferenció entre cada una. El presente apartado también menciona sobre la caracterización geoambiental de las condiciones naturales, los primeros pobladores y el uso de la ciénaga en diversas etapas históricas dentro de un espacio determinado.¹

3.1. Época prehispánica

El pueblo de Coaticpac, que es el verdadero nombre de la Concepción, se ha degenerado en Coatípac, es uno de los pueblos que pertenecen a Calimaya, de los más antiguos, se caracterizó por ser un asentamiento mexica o nahua (año 1200), cuya toponimia en náhuatl significa sobre las serpientes; que proviene de Coatli, serpiente y Ticpac. Este asentamiento

se creó por la migración de los tlaltelolcas que fundaron San Bartolito. En el año 1476, se suscitó la dominación mexica del Valle de Toluca, lo que originó dicha migración, debido a que los mexicas buscaron refugio, debido a la conquista, en lugares boscosos e inhóspitos (pantanosos), como es el caso de Coactipac, que era el sitio ideal para ocultarse de los enemigos que los perseguían (Jarquín, 1995).

Coatípac, tuvo su primer nombre que fue Tecuantitlán, que proviene de la raíz náhuatl *Tecua*, que quiere decir Lobo y *titlan* que significa “entre”. Antes de encontrar donde establecerse tuvieron que convivir con lobos, coyotes y tejones que bajaban a tomar agua a la posa; lo que hacía que los habitantes se ocultaran en la penumbra de la noche antes de encontrar donde establecerse. Los sitios tenían gran abundancia de agua, los cuales eran: la posa, la rueda y el pozo grande, actualmente secos (Jáurez, 2015).

En la época prehispánica las viviendas de los primeros pobladores eran enramadas, es decir con paredes de varas y techo de zacatón, este asentamiento era de origen mexicano o mexica, recibió la influencia de la población minoritaria que eran los matlatzincas, quienes se dedicaban a la agricultura, la caza de aves y la pesca de especies lacustres. Entre los objetos que elaboraron, destacan las hondas para cazar, las redes y los petates (Jáurez, 2015).

Los nahuas de Coatípac aprendieron a pescar el salmiche o pescado blanco (*Chirostoma estor*), atepocates o rana común (*Pelophylax perezi*), ajolote mexicano (*Ambystoma mexicanum*), acociles (*Cambarellus*) entre otras especies que extraían de la ciénaga y laguna del Chignahuapan, ubicada al sureste de la localidad y en lugares cercanos. El asentamiento original ocupado fue una depresión o hundimiento, en la que se han encontrado figuras de piedra, vasijas, cajetes y otros utensilios en un lugar conocido como el panteón, donde se ubica actualmente el panteón municipal. Con la dominación de los mexicas, algunos pueblos estaban habitados por los matlatzincas y la emigración nahua, esto hizo que, dichos lugares se poblaran con tepanecas, texcocanos y mexicas, quienes no eran bien vistos por los pobladores autóctonos (Escalante, 2010).

3.2. Época colonial

En la Colonia, al respecto el historiador mexicano René García Castro afirma que Santa María Concepción, que fue el nombre que le antepusieron al poblado, (García Castro, 1999) al imponer el culto de la purísima concepción, erguida sobre una culebra, cuyo templo se construyó en 1616. Sobre la Concepción, catalogada como una entidad acuática, que desplazó a la veneración a las diosas relacionadas con los rituales de la zona lacustre, Maruri, en el libro *Montañas y volcanes de América*, afirma que estas deidades se sincretizaban con las advocaciones marianas, aquí cabe mencionar a la virgen de la Concepción, en cuyos atributos se manifiesta como dadora de vida, entidad acuática que vive en el paraíso rodeada de querubines que la acompañan en su plenitud como virgen procreadora y portadora de la cosmovisión lunar. La virgen de la Concepción y de la Candelaria mantienen una estrecha relación con el agua y la humedad, por tanto, se relacionan con las sirenas cuando son entidades femeninas que se asocian con la seducción y la procreación, por lo tanto, las vírgenes son símbolos de lo cíclico, del tiempo, de la fertilidad y los ritmos lunares (Maruri, 2014: 128).

La Concepción, aparece como Atipac y también como Concepción de los Álamos, poblado sujeto de Toluca, una localidad cuyo beneficiario era Texcoco, con lo que puede deducirse que los habitantes nahuas pertenecían en la época antigua al grupo de los Tecuanipas (grupo de origen chichimeca). Sin embargo, Javier Romero Quiroz, afirma que, en algunos escritos de los naturales del siglo XVII, acerca de las tierras otorgadas al inicio de la Colonia a las localidades de Tototepec y Concepción Atipac eran sujetos a Toluca. Se mencionaron a ciertos individuos con apellido que evocaba el parentesco con el rey texcocano como Bernardino Santa María Netzahualcoyotzin y Don Alonso de la Cruz Netzahualcoyotzin (Gracia Castro, 1999).

Los pobladores obtenían de la laguna o ciénega del alto Lerma, plantas comestibles como se menciona que, aunque el barrio de la Concepción no era ribereño, había gente que

entraba a la laguna a recoger pastura destinada al autoabastecimiento y las familias tenían unas cuantas cabezas de ganado. Aproximadamente entre 4 o 5 reses, entraban a recoger pastura (Albores, 1995). Como se puede notar, la zona lacustre proveía a los habitantes de Coatípac de todo lo necesario para su subsistencia, desde productos alimenticios como pescados y aves hasta fibras naturales, como con la domesticación del ganado mayor (vacas).

En 1603 (siglo XVII) durante la época de las congregaciones o uniones forzadas de los pueblos por parte de la corona española, a Coatípac, lo obligaron a unirse a Mexicaltzingo, por disposición del Virrey, Marqués de Montes Claros, además de San Bartolomé Tlaltelolco (Loera Chávez y Arriaga, 2010).

Posteriormente, en 1606 estuvo unida a *Otompá* (San Antonio la Isla), poblado del que se separó tiempo después (año 1656) para seguir perteneciendo a Calimaya. El pueblo perteneció a una de las instituciones nobiliarias más importantes entre el siglo XVI y XVII, como fue a la encomienda del conde de Santiago Calimaya. Al respecto el profesor Miguel Jáurez, relata lo siguiente: *En aquella época los lugareños sacaron a la Virgen de la Purísima Concepción, a un lugar denominado como la Purísima, para que el hacendado no siguiera extendiendo sus dominios, quien era descendiente de los Gutiérrez Altamirano, pensando que la respetaría, pero éste en vez de hacerlo la lazo y quiso arrastrarla y en el camino el caballo se le encabritó y lo tiró. Aunque se desconoce si fue camino a su hacienda o en ella* (Palacios, 1998).

Con esta acción los habitantes del pueblo, evitaron ser absorbidos por la hacienda de Atenco y caer bajo su servidumbre. A mediados del siglo XVII (año 1650) los habitantes de la Concepción Coatípac, establecieron litigio con su cabecera (Calimaya) con la pretensión de elegir sus propios gobernadores y oficiales, permite observar que deseaban autonomía para tomar sus decisiones, acontecimiento que marcaría el inicio de la fragmentación de los pueblos otomianos en el siglo siguiente (García Castro, 1999).

En 1701, Mexicaltzingo, San Andrés Ocotlán y la Concepción Coatípac, pretendían separarse de Calimaya, sólo les otorgaron el permiso para elegir gobernador y oficiales, tenían que hacer sus obvenciones en la iglesia parroquial. Este acontecimiento fue decisivo, debido a que, en el siglo XVIII, marcaba los albores de la autonomía de algunos pueblos sujetos a la cabecera, quienes antes de ocupar su territorio actual fungían como barrios. Este siglo fue el marco en el que se manifestaron los ánimos “independentistas” de los criollos por reivindicarse y obtener el acceso a los principales cargos públicos como lo hacían los españoles (Semo, 1991).

3.3. Época Independiente

Es importante ubicar dentro del contexto de la Época Independiente al proceso histórico del día 16 de septiembre de 1810, cuando se conmemora la Independencia de México y su consumación en 1821. Esto buscaba lograr la autonomía de la Nueva España frente a España donde hubo dos movimientos diferentes. El primero, fue un movimiento social y político, encabezado por personajes como Miguel Hidalgo y José María Morelos, finalmente, el segundo movimiento fue formado principalmente por la milicia lo que permitió la finalización de la Independencia (Castillo, 2020).

Dentro de este movimiento independentista no afectó el acontecer de La Concepción Coatípac, ya que Hidalgo y las tropas insurgentes, sólo pasaron en su camino rumbo a la sierra o monte de las cruces. La segunda mitad del siglo XIX en México, fue una época, en que, en el escenario nacional, prevaleció la inestabilidad política por medio de los golpes de estado o cuartelazos y en el ámbito social, el bandolerismo y los salteadores de caminos que hicieron que prevaleciera un ambiente de inseguridad nacional (Semo, 1991).

En 1847, durante la invasión norteamericana a México, los habitantes del pueblo se enrolaron en las tropas nacionales que organizaron la defensa en contra del invasor extranjero. A finales del siglo XIX y principios del XX, se desarrolló el comercio y la arriería antes de la introducción de los camiones de carga. En la localidad se establecieron algunas

familias acaudaladas como; los Valle, Linas, Luna y Nájera. En 1906 a nivel nacional se manifestó una fuerte escasez de alimentos, el acontecimiento fue un antecedente de la “Revolución Mexicana”, sólo que no afectó a la localidad, pues desde tiempos inmemoriales hasta 1940 ha basado su economía en la obtención de productos lacustres (Semo, 1991).

3.4. Siglo XX. Desección de la ciénega y laguna

En 1917 durante el reparto agrario, donde se cristalizaron las ideas de Zapata y el campesinado de todo el país, los habitantes de Coactipac, fueron beneficiados con el reparto de las tierras que pertenecían a la hacienda de Atenco, quienes las usufructúan en propiedad ejidal. Durante 1940 y hasta 1970, el pueblo basó su economía en la obtención de productos de la zona lacustre del Chignahuapan, la situación se perpetuó hasta que se desecó la laguna, para llevar el agua a la ciudad de México (Orellana, 1988).

A principios de la década de los 40 del siglo XX, la señora Julia Sánchez de León, originaria de Santa Ana Tlapaltitlán, esposa de Tomas Cabrera, les enseñó a los habitantes, a tejer cestos, floreras y papeleras con palma. Con el paso del tiempo, casi todo el pueblo ya practicaba esta actividad. Sin embargo, por los adelantos tecnológicos y la producción en serie, estos productos fueron perdiendo la demanda y ante las bajas ventas tuvieron que buscar otras alternativas para mejorar el ingreso familiar como trabajar de obreros en la zona industrial de México o Toluca (Orellana, 1988).

3.5. Época contemporánea. De la ciénega a conjuntos urbanos

En la época contemporánea se incrementaron los servicios básicos como la electrificación, el agua potable y el drenaje, sólo que el transporte es un rubro se mantuvo muy deficiente (Orellana, 1988). A principios del siglo XXI, ya una vez desecada la ciénega y gran parte de la Laguna del Chignahuapan se comenzó una urbanización acelerada con la construcción de conjuntos urbanos de interés social como El Nevado y Ex-Rancho San Dimas territorio que en la época colonial pertenecían a Calimaya, y que ahora pertenecen al municipio de San Antonio la Isla.

Una de las problemáticas que enfrenta esta delegación es la falta del tratamiento de las aguas residuales, donde estas son vertidas a cielo abierto y las plantas de tratamiento no funcionan. Siendo una de las problemáticas que enfrentan las ciénagas del valle de Toluca como lo afirman los datos del “Programa de Manejo del Área de Protección de Flora y Fauna ciénega del Lerma”, los resultados de nueve sitios monitoreados dentro de este espacio registran indicios de contaminación con descargas. Donde, en dos sitios se identificaron residuos de descargas de aguas residuales crudas, con contenido de materia orgánica y aguas con indicios de contaminación (Mata, 2024).

Los habitantes de Coatípac vendieron parte de su propiedad privada que se ubicaba en lo que fue el Rancho San Isidro para la creación del conjunto urbano de Valle del Nevado, luego volvieron a realizar otra venta, ahora, parte del ejido, que se considera comunal. Uno de los retos que tiene que enfrentar en la actualidad sus habitantes, es que tienen que seguir fortaleciendo su identidad y sus raíces, debido al sincretismo sociocultural que traen personas provenientes de otros lugares y combatir las imposiciones exteriores (Arriaga y Camacho, 2017).

Sí se coloca el área delegacional actual, en el territorio colonial se puede observar que abarcaba aproximadamente el 50 % de la zona lacustre. Es importante mencionar que el agua reconoce su cauce y distribución en temporada de lluvia (Figura 4).

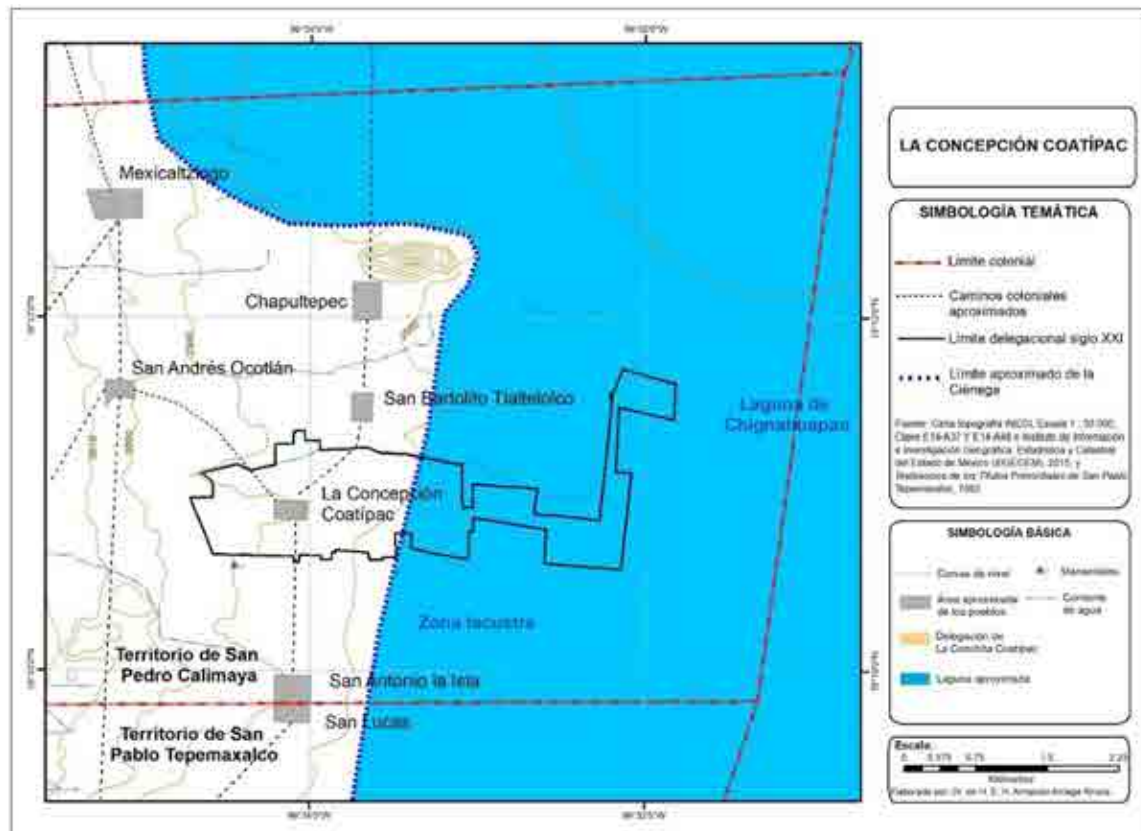


Figura 4. La Concepción Coatípac durante la Colonia.

Fuente: Carta topografía INEGI, Escala 1: 50 000, Clave E14-A37 Y E14-A48 e Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México (IIIGCEM) (2015); y Testimonios de los Títulos Primordiales de San Pablo Tepemaxalco (1562).

4. Discusión

La tendencia actual de las políticas públicas dentro del municipio de Calimaya es el fomento al desarrollo urbano y la urbanización de zonas que antes era destinadas a la agricultura y que eran de alta productividad agrícola. Esto, en coherencia con el Plan Municipal de Desarrollo Urbano publicado y autorizado en el año 2022, donde justifican que el municipio de Calimaya forma parte de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, y es uno de los

municipios que ha presentado en los últimos años una urbanización acelerada, principalmente ofertando viviendas de tipo medio y residencial. Asimismo, menciona que su plan vigente fue aprobado recientemente, en el año 2020, sin embargo, en éste comentan que se dejaron fuera varios predios que ya contaban con derechos adquiridos y al asignarles una categoría de no urbanizable afectó la operación adecuada de este instrumento (H. Ayuntamiento de Calimaya, 2022).

También afirma que en la modificación anterior del plan se abandonaron áreas consolidadas, donde su crecimiento se realiza sin ninguna homogeneidad y sin orden (H. Ayuntamiento de Calimaya, 2022). Esto indica que existe falta de atención en la aplicación de la normatividad en zonas que no están destinadas a la urbanización y que les dan la oportunidad de consolidarse.

Esta tendencia de fomento a la urbanización también se presenta en la delegación de la Concepción Coatípac, donde el panorama actual de la delegación es totalmente diferente que, en el pasado, hasta hace algunas décadas los cambios territoriales de uso del suelo fueron drásticas, afectando a las actividades económicas principales y cambiando modificando las zonas lacustres y de agricultura.

El uso del suelo en la delegación de La Concepción Coatípac se conforma de la siguiente forma: el uso agrícola es de 273 hectáreas, que corresponde con el 70% del total de la delegación, el tipo de cultivo es agrícola de temporal. El segundo uso predominante, es el urbano que corresponde con las 70 hectáreas, que registra el 17.6% y el área en proceso de urbanización corresponde al 12.4%, siendo 70 hectáreas. Es importante destacar que el crecimiento urbano ha sido rápido por la presencia de los fraccionamientos, lo que ha perjudicado a la agricultura, una actividad importante para los habitantes de La Concepción (Figura 5).

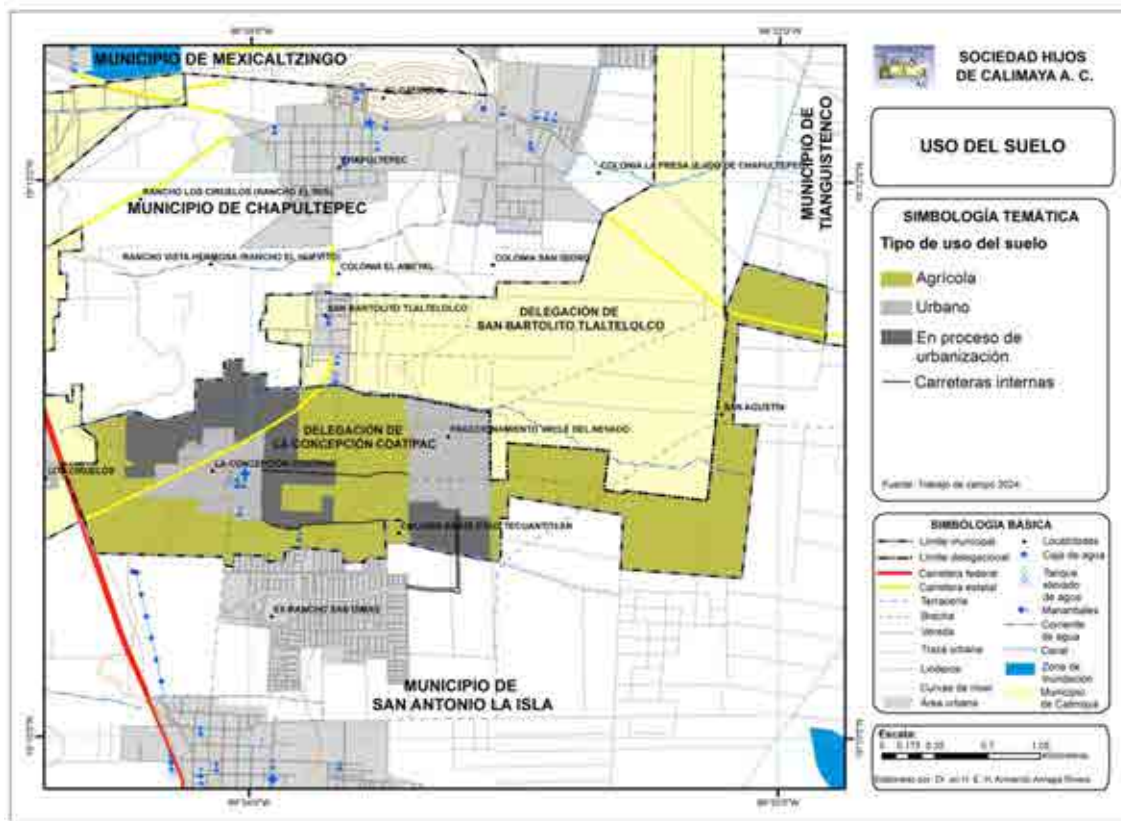


Figura 5. Uso del suelo de la delegación de La Concepción Coatípac, municipio de Calimaya.

Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, el investigador José Isabel Juan Pérez señala que comprender la ecología cultural y la geografía ambiental coadyuvan al análisis espacio-temporal de las interacciones que condicionan los procesos socioambientales, el cambio de uso del suelo y el manejo del agua en la agricultura (Juan Pérez, 2019). En el caso de la Concepción Coatípac esta dinámica de los usos del suelo está estrechamente relacionado con la presencia del agua, como comenta José Isabel Juan, tanto la que existía por la ciénaga de la laguna del Chignahuapan en el pasado y las zonas de inundación en temporada de lluvia, más el agua residual que hoy se vierte por los asentamientos humanos.

Fuente: Registro Agrario Nacional (RAN) (2015) y trabajo de campo de los autores (2024).

5. Conclusiones

Este trabajo pretende explicar desde la historicidad las transformaciones del uso del territorio y, como con el paso se fue desarrollando un cambio en el suelo por la urbanización, impactando el ambiente lacustre y agrícola tradicional que predominó durante siglos. El trabajo, permitirá que las autoridades tomen decisiones acordes a las problemáticas actuales y reorienten las políticas de ordenamiento territorial con una planeación eficaz para abastecer los servicios públicos a la población de los pueblos antiguos como en los conjuntos urbanos.

Asimismo, la investigación trata sobre el cambio que ha tenido el territorio de la delegación de La Concepción Coatípac, ubicada en el actual municipio de Calimaya. La vida cotidiana de los habitantes de la delegación ha sufrido variaciones en correspondencia con su espacio, como se observó en la información presentada, sus habitantes vivían de lo que producía la zona lacustre principalmente, por estar asentada la población cerca de este ecosistema (ciénaga) muy propio de lo que era la laguna del Chignahuapan.

Las actividades económicas de los habitantes originarios enfocadas en los productos lacustres y de la agricultura han cambiado, esto debido a la urbanización de los nuevos asentamientos. Ahora, las actividades de la mayoría de la población originaria se enfocan en el sector secundario, la industria y el sector terciario, los servicios, desplazándose a los municipios de Toluca, Metepec, Tianguistenco y Tenango del Valle.

Finalmente, parte de lo que antes era la ciénaga de la laguna de Chignahuapan, ahora son áreas agrícolas de carácter ejidal y conjuntos urbanos. Estas zonas tienden a inundarse en época de lluvia y en ellas se vierten aguas residuales de las localidades del municipio de Calimaya y ahora también de los conjuntos urbanos.

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

6. Referencias

Albores, B. (1995). *Tules y sirenas: el impacto ecológico y cultural de la industrialización en el Alto Lerma, Toluca, México*: El Colegio Mexiquense, A. C. y Gobierno del Estado de México.

Arriaga, A. y Camacho, O. J. (2017), *Delegación de La Concepción Coatípac, pueblo de pescadores y tejedores de palma, Tomo 1* (versión digital), México: Sociedad Hijos de Calimaya, A. C.

Castillo, N. (2020). *Independencia de México. Lo más relevante de la lucha que inició el 16 de septiembre de 1810*. México: Universidad Nacional Autónoma de México. <https://ciencia.unam.mx/leer/1039/independencia-de-mexico-lo-mas-relevante-de-la-lucha-que-inicio-el-16-de-septiembre-de-1810>

Comisión Nacional de áreas naturales protegidas (CONANP) (2024). *Ciénegas del Lerma*. CONANP. <https://simec.conanp.gob.mx/ficha.php?anp=20®=7>

Collazo Odriozola, Jaime (2012), *La periodización*, Colección Cuadernos de Tlamatini, Facultad de Humanidades de la Universidad Autónoma del Estado de México

Escalante, P. (2010). *“El México Antiguo” Historia mínima de México*, México: El Colegio de México, A. C.

García, R. (1999). *Indios, territorios y poder en la Provincia Matlazinca. La negociación del espacio político de los pueblos otomianos, siglos XV-XVII*. México: CONACULTA, INAH. Colegio Mexiquense.

H. Ayuntamiento de Calimaya (2022). Plan Municipal de Desarrollo Urbano del Municipio de Calimaya, H. Ayuntamiento de Calimaya. <https://sedui.edomex.gob.mx/sites/sedui.edomex.gob.mx/files/files/Planes%20Parciales%20de%20DU/Calimaya/PLAN%20MUNICIPAL%20DE%20DESARROLLO%20URBANO%20E%20CALIMAYA.pdf>

Hernández, M. A, Levin, D. A., Jerónimo, S. y Martínez, L (2024). *El campo de la historiografía* (versión actualizada). Posgrado en Historiografía, Universidad Autónoma Metropolitana.

Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral (IIIGECM), (2015) *“Información catastral”*, IIIGECM

Juan J. I. (2019). Cambios de uso del suelo y su influencia en la agricultura de riego en el Subtrópico Mexicano. *Economía, Sociedad y Territorio*, vol. XIX, núm. 61, 2019, 601-630. DOI: <http://dx.doi.org/10.22136/est20191357>

Jarquín, M. T. (1995). *Breve historia del Estado de México, Época prehispánica*, México: El Colegio mexiquense, A. C.

- Jáurez Osollo, Miguel, 2015. Información proporcionada por entrevista en mayo de 2015.
- Loera Chávez, M y Arriaga, A. (2010) La sierra nevada de Calimaya (sus tiempos y espacios). Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) y Escuela Nacional de Antropología e Historia (ENAH).
- Loera, M. y García, F. (1999). Monografía del municipio de Calimaya, México. Instituto Mexiquense de Cultura y Asociación Mexiquense de Cronistas.
- Mata, M. (2024). Ciénegas del Lerma, amenazadas por el crecimiento del Valle de Toluca y las aguas residuales. Milenio. <https://www.milenio.com/politica/comunidad/cienegas-lerma-amenazadas-crecimiento-valle-toluca>
- Maruri, M. E. (2014). Representaciones de la montaña sagrada en la iconografía religiosa en Cabrera R., Iwaniszewski, S. J., y Loera Chávez, M. (Coordinadores). América, tierra de volcanes y montañas III, México: INAH.
- Orellana, M. (1988). *Villa y Zapata la revolución mexicana, Zapata íntimo*, México: Anaya, Biblioteca Iberoamericana.
- Palacios, J. G. (1998). *Monografía Municipal Mexicaltzingo*, México: AMECROM e Instituto Mexiquense de Cultura, Gobierno del Estado de México.
- Rivera, I. (2003). Tenencia de la tierra y derechos agrarios; en: Sitio oficial de SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación): Disponible en: http://www.sagarpa.gob.mx/sdr/evets/sm_jovenes/pdfs/1_eirr_sra.pdf.
- Semo, E. (1991). *Un pueblo en la historia, La revolución de independencia y consecuencias que rompen la estructura de la insurgencia*, México: Alianza editorial mexicana.

Panorama geológico de Temascaltepec: una contribución a la investigación con enfoque geográfico y ambiental

Geological panorama of Temascaltepec: a contribution to research with a geographical and environmental focus

Stefanni Guadalupe Ruíz Muñoz ¹ y Daniel Fernando Gómez Benítez ^{2*}

¹ Geoenvironmental Services S.A. de C.V. Acapulco 36 Colonia Roma Norte Cuauhtémoc, Ciudad de México CP 06700, fannirmu@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-0971-8282>

² Coordinación General de Protección Civil y Gestión Integral del Riesgo del Estado de México, Vialidad Adolfo López Mateos s/n Colonia las Culturas, C.P. 51350, Zinacantepec, Estado de México, ferx.geouaemex@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8800-131X>

*Autor de correspondencia

Recibido: 26/11/2024. Aceptado: 06/01/2025. Publicado: 21/01/2025.

Cómo citar: Ruíz Muñoz, S., & Gómez Benítez, D. (2025). Panorama geológico de Temascaltepec: una contribución a la investigación con enfoque geográfico y ambiental. *Geografía Aplicada*, 1(1), 41-78. Consultado de <https://geografiaaplicada.uaemex.mx/article/view/25617>

Resumen

Temascaltepec al igual que el resto de las zonas que conforma la Sierra Volcánica Transversal (SVT) expone una historia geológica diversa y compleja. El espacio geográfico objeto de estudio es caracterizado exhaustivamente desde el punto de vista físico. En concreto, se identifican los principales eventos tectónicos que ocurrieron en la zona de estudio, se emplea un enfoque cualitativo por la naturaleza de la información requerida. Los estudios geológicos son parte fundamental de la investigación en Geografía ambiental porque proporcionan información sobre la composición, estructura y evolución de la Tierra. Esta información es esencial para entender procesos naturales como el clima, la erosión, el vulcanismo, los terremotos y la evolución de paisaje. Además, los resultados obtenidos, contribuyen a evaluar los recursos naturales, los riesgos geológicos y los impactos de las actividades humanas en el medio ambiente, permitiendo una planificación y gestión sostenible del territorio.

Palabras clave: Geografía ambiental, Geología, Paisaje, Tectónica.

Abstract

Temascaltepec, like the rest of the areas that make up the Transversal Volcanic Sierra (SVT), presents a diverse and complex geological history. The geographical space under study is thoroughly characterized from a physical perspective. Specifically, the main tectonic events that occurred in the study area are identified, using a qualitative approach due to the nature of the information required. Geological studies are a fundamental part of environmental geography research since they provide information on the composition, structure, and evolution of the Earth. This information is essential for understanding natural processes such as climate, erosion, volcanism, earthquakes, and landscape evolution. Furthermore, the results obtained contribute to evaluating natural resources, geological risks, and the impacts of human activities on the environment, enabling sustainable land planning and management.

Keywords: Environmental Geography. Geology, Landscape, Tectonics.

1. Introducción

Temascaltepec al igual que el resto de las zonas que conforma la Sierra Volcánica Transversal (SVT) expone una historia geológica diversa y compleja (Camprubí, 2003). En 1998, Camprubí publicó su tesis doctoral “Los depósitos epitermales de Ag-Au de Temascaltepec (Estado de México) México”, donde se dio a la tarea de determinar la estratigrafía y la secuencia paragenética de las diversas asociaciones y contribuyó al conocimiento de los depósitos minerales. Años más tarde, le dio continuidad a su investigación y fue en el año 2003 cuando redactó el artículo “Geoquímica de fluidos epitermales del sureste del Distrito de Temascaltepec, Estado de México” respondiendo algunas interrogantes del trabajo anterior. Finalmente, en 2006 difundió una recopilación actualizada de los depósitos epitermales de México, sirviendo como aporte a los trabajos ya expuestos.

Sin embargo, Camprubí realizó un apartado en su tesis doctoral “Direcciones de investigación futura” donde enfatizó la importancia de continuar con los estudios de la zona para caracterizar la geología y determinar el origen de los materiales existentes. No obstante, y a pesar de la cantidad de investigaciones sobre su contexto geológico, mineralógico, petrológico y geofísico, ha sido todavía un reto asegurar su correcta descripción y comprensión, debido a la complejidad de este. Esta historia evolutiva parte de cuatro etapas fundamentales: (1) el descubrimiento de un arco de composición intermedia que data del mioceno medio y tardío; (2) la ocurrencia simultánea de un evento máfico del mioceno tardío; (3) un proceso silíceo de finales de mioceno y principios del plioceno temprano; y (4) la reconstrucción de un arco composicional que comienza a partir del plioceno tardío (Ferrari *et al.*, 2005).

Es por ello que se sugiere retomar investigaciones anteriores para tener la posibilidad de guiarnos con mayor facilidad en el proceso de exploración, y a su vez, expandir el tema que

se analizó de manera intermitente en años anteriores para conocer la evolución, formación e interrelaciones dentro del espacio de la superficie terrestre estudiando aspectos que afectan directa o indirectamente al territorio. El presente estudio pretende hacer un análisis del panorama geológico de Temascaltepec, para poder brindar información que sea de utilidad para estudios futuros.

Desde un enfoque técnico, los estudios geológicos en geografía ambiental abordan temas claves como:

1. Evaluación de riesgos geológicos: La identificación y evaluación de riesgos relacionados con terremotos, deslizamientos de tierra, erupciones volcánicas y tsunamis son fundamentales para la planificación y la gestión de riesgos en áreas vulnerables. Los datos geológicos permiten modelar la distribución de estos riesgos y sus potenciales impactos (Serrano, 2018).
2. Estudios de suelos y recursos hídricos: La caracterización de los suelos y las formaciones geológicas subyacentes es crucial para comprender la conservación del agua y la capacidad de los suelos para soportar actividades agrícolas, forestales o urbanas. Además, la identificación de acuíferos y fuentes de agua subterránea permite evaluar la disponibilidad de recursos hídricos y su relación con el cambio climático.
3. Análisis de procesos geomorfológicos: El estudio de la evolución de los paisajes terrestres, como la formación de montañas, valles, llanuras y cuencas hidrográficas, permite entender cómo los procesos geológicos interactúan con los factores climáticos y biológicos, y cómo estos procesos afectan el medio ambiente y las sociedades humanas a lo largo del tiempo (Camprubí, 1999).
4. Impacto de la actividad humana: Los estudios geológicos son fundamentales para evaluar el impacto de las actividades humanas, como la minería, el urbanismo y la agricultura, en el entorno geológico. La degradación del suelo, la contaminación de acuíferos y los cambios

en los ciclos geobiológicos son algunos de los efectos que requieren un análisis geológico profundo para mitigar su impacto.

En resumen, los estudios geológicos proporcionan una base científica clave para la gestión ambiental sostenible, la prevención de desastres y la adaptación al cambio climático, al permitir una comprensión precisa de la dinámica de la Tierra y sus recursos.

2. Área de estudio

El municipio de Temascaltepec está situado en la parte suroeste del Estado de México, entre las coordenadas geográficas 100°14'20" y 19°13'54" longitud y latitud, respectivamente, colinda al norte con los municipios de Amanalco, Zinacantepec y Valle de Bravo; al este con Coatepec Harinas; hacia el sur con Texcaltitlán y Tejupilco; y al oeste con el municipio de Zacazonapan (Figura 1).

El sistema de topoformas que predomina en el área de influencia está constituido por sierras pertenecientes a la subprovincia de la Depresión del Balsas y a la Provincia de la Sierra Madre del Sur, compuesta por laderas que tienen pendientes de 5 a 25% (Serrano, 2018).

Un clima templado subhúmedo C (w2), cubre aproximadamente el 54% de la superficie, seguido de un clima semicálido tropical lluvioso ACw2, clima semifrío subhúmedo con verano fresco y finalmente el clima tropical lluvioso con lluvias en verano A (w1) (Clasificación climática según Köppen modificada por García, 1998).

La hidrología está constituida por ríos, arroyos y manantiales que son afluentes del río Cutzamala, mismo que desemboca en el río Balsas, dicha región tiene una superficie territorial de 117 308 km² (CONAGUA, 2024).

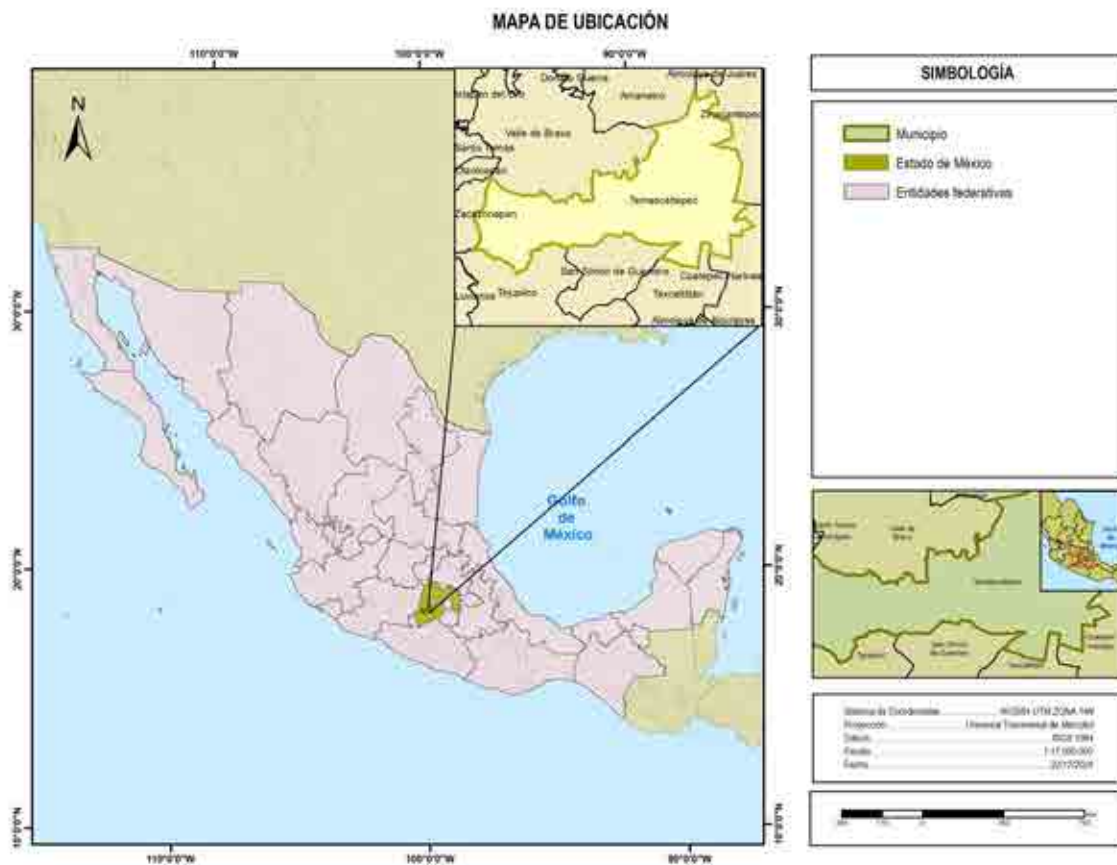


Figura 1. Mapa de ubicación del municipio de Temascaltepec.

Fuente: Elaboración propia.

En el municipio confluyen dos provincias geológicas: la Sierra Volcánica Transversal y la Sierra Madre del Sur. En primer lugar, se caracterizan por ser un conjunto de rocas volcánicas que datan de 35 millones de años de antigüedad y, por otro lado, la litología suele ser compleja; rocas intrusivas cristalinas, respectivamente.

Se identifican rocas de tipo volcánica del terciario con el 39.5% de la superficie total, roca volcánica del plioceno cuaternario presente en un 29.33% del territorio, rocas clásicas que cubren el 18.46% y en menor porcentaje, rocas cársticas, extrusivas, sedimentarias y carbonatas (H. Ayuntamiento de Temascaltepec, 2016).

Las rocas que conforman el municipio de Temascaltepec datan del Neógeno (23-5 millones de años, 53.40%) Cuaternario (2.5 millones de años, 37.3%) y Cretácico (175-66 millones de años, 3.21) (Tabla 1 y Figura 2)).

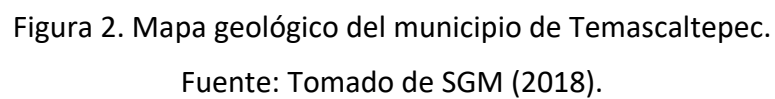
Tabla 1. Representación esquemática de las unidades litológicas del municipio de Temascaltepec.

Unidades litológicas	
Ígnea extrusiva	Basalto (33.19%), andesita (19.87%), riolita (6.97%), dacita-toba ácida (1.95%), toba básica (1.6%), brecha volcánica ácida (0.79%), brecha volcánica básica (0.28%), toba ácida-brecha volcánica ácida (0.13%) y toba ácida (0.07%).
Ígnea intrusiva	Granito (3.21%) Sedimentaria: brecha sedimentaria (23.69%).
Metamórfica	Metasedimentaria (4.19%) y esquisto (1.65%) Suelo: aluvial (1.24%)

Fuente: Tomado de Serrano (2018).

La litología que conforma la provincia de la Faja Volcánica Transmexicana abarca la parte norte del estado y se caracteriza por tener en su mayoría rocas volcánicas cenozoicas que datan del Paleógeno-Neógeno y Cuaternario, no obstante, se han encontrado indicios de la existencia de afloramientos de rocas del triásico como filitas y pizarras (CONAGUA, 2024).

Con respecto al riesgo por deslizamiento, las pendientes con menor inclinación van de 20° a 25°, es decir, son zonas menos susceptibles a los deslizamientos, por el contrario, las pendientes que se encuentran arriba de 40° pertenecen a zonas de alto riesgo de deslizamientos (Serrano, 2018) (Figura 3).



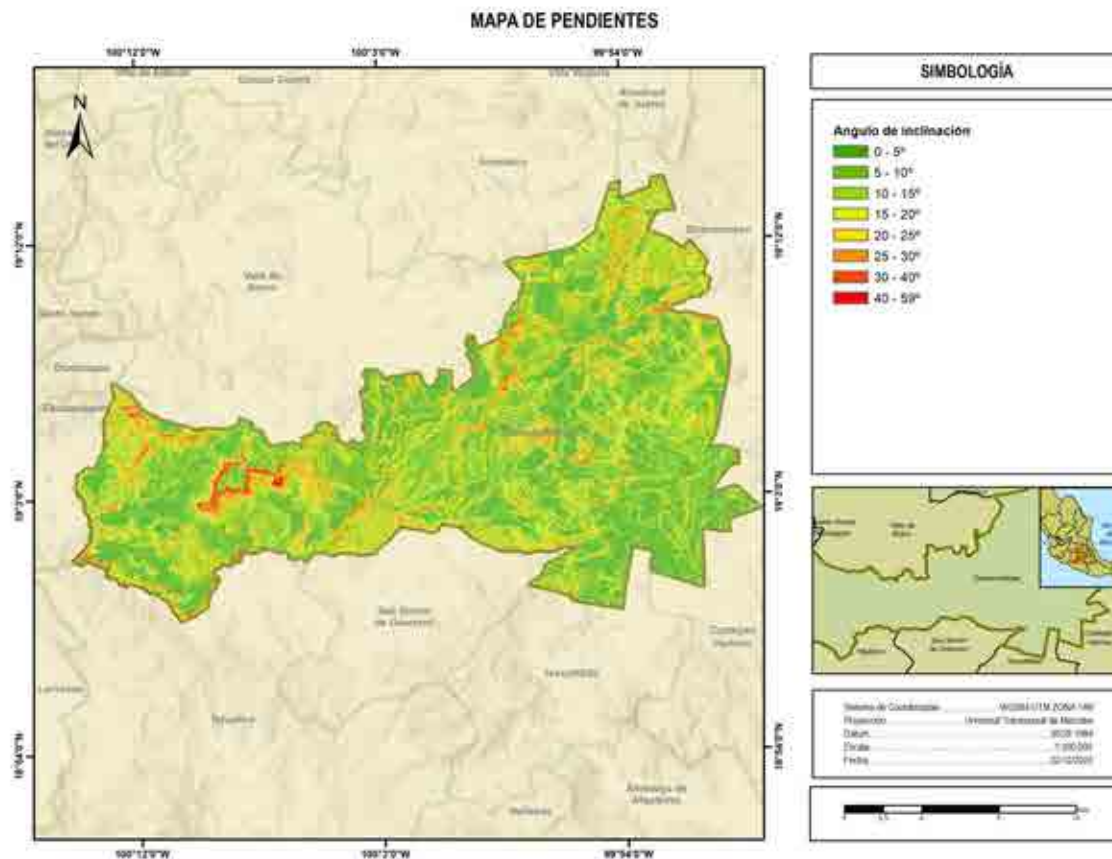


Figura 3. Mapa de pendientes del municipio de Temascaltepec.

Fuente: Elaboración propia

2. Metodología

Antes de precisar el desarrollo metodológico del trabajo, es conveniente señalar que la investigación tiene un enfoque cualitativo por la naturaleza de la información requerida, la cual precisa de observación directa, así como de levantamiento de datos para su procesamiento e interpretación.

A partir de este enfoque se determinó que el alcance de la investigación es de índole explicativa, es por ello por lo que la metodología propuesta requiere un desarrollo metódico que permita la adecuada consecución de los objetivos planteados.

Dicho lo anterior, el presente estudio se compone de dos fases: (1) Trabajo interpretativo y (2) Trabajo de campo. A sí mismo, se realizó la descripción de las fuentes de información consultadas como las Cartas Temáticas de INEGI, usando el software de procesamiento QGIS versión 3.10.14 para la geolocalización y verificación de la información y finalmente el trabajo de campo (Figura 4).

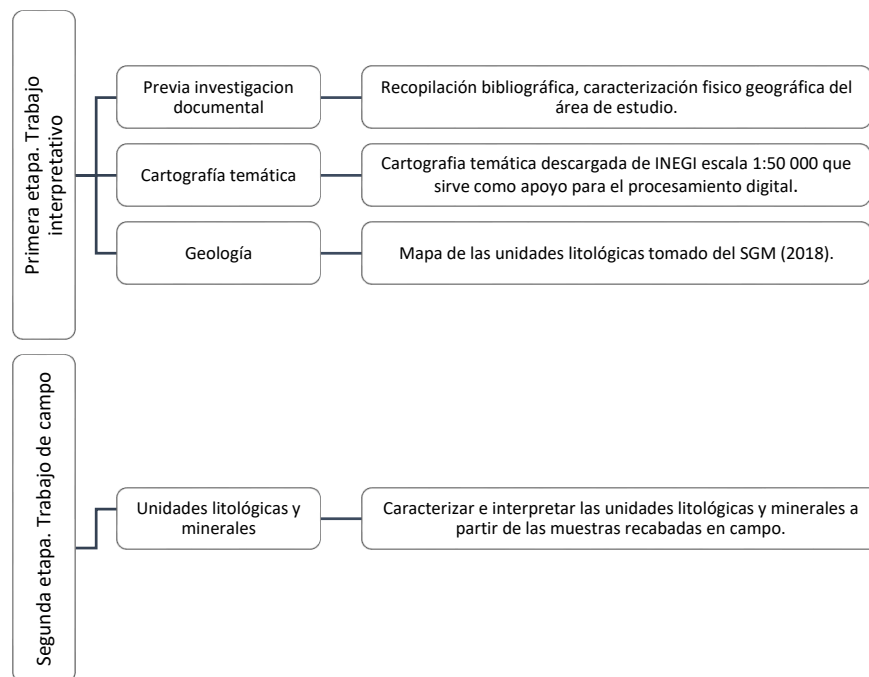


Figura 4. Secuencia Metodológica.

Fuente: Elaboración propia

2.1. Cartas temáticas INEGI 1:50,000

El SIG ha sido integrado por una serie de capas geográficas básicas como relieve, corrientes de agua, límites estatales y municipales, todas provenientes de la cartografía generada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) a escala 1:50 000.

2.2. Software de procesamiento QGIS versión 3.10.14

En el procesamiento, se utilizaron capas correspondientes a diversos factores tales como edafología, geología, tipo de clima y pendiente, las cuales se han obtenido de varias fuentes como INEGI y la Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad (CONABIO). Hay que mencionar además que, la cartografía que no ha estado disponible para su descarga en formato shapefile, se ha generado desde la digitalización de las cartas temáticas que ofrece INEGI, a una escala 1: 50 000 del área de estudio.

2.3 Investigación documental

En palabras de Alfonso (1995), la investigación documental es un proceso sistemático de indagación, recolección, organización, análisis e interpretación de información o datos de acuerdo con un tema en específico.

Citando a Kaufman y Rodríguez (1993), este tipo de análisis se dispone, principalmente, de estudios, que son el resultado de trabajos previos que nos ayudan a justificar la base teórica del área objeto de investigación, lo que nos permite construir información actualizada a partir del análisis, reflexión e interpretación de dichos documentos (Figura 5).

Por consiguiente, el presente documento se basa en investigaciones documentales tomadas principalmente de Antoni Camprubí, quién publicó en 1998 su tesis doctoral “Los depósitos epitermales de Ag-Au de Temascaltepec (Estado de México) México”, seguido de ello, en el año 2003 redactó el artículo “Geoquímica de fluidos epitermales del sureste del Distrito de Temascaltepec, Estado de México”, y finalmente, en 2006 difundió una recopilación actualizada de los depósitos epitermales en México, sirviendo como aporte a los trabajos ya expuestos.

Al mismo tiempo y como se mencionó con anterioridad, la metodología consistió en la combinación de enfoques con predominancia cualitativa y un diseño basado en la teoría fundamentada. Es decir, bases de datos del Censo de Población y Vivienda (2020),

documentos elaborados por parte del H. Ayuntamiento de Temascaltepec (2019) y fuentes que nos brindara información acerca de la caracterización físico-geográfica del municipio.

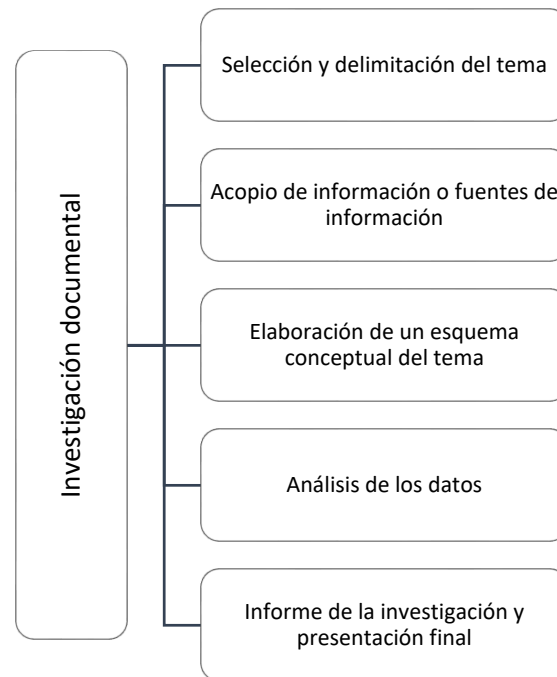


Figura 5. Pasos de la investigación documental.

Fuente: Elaboración propia

2.4. Trabajo geográfico y geológico de campo

En este punto y para cumplir los objetivos propuestos con anterioridad, se propuso un plan de trabajo conformado por dos etapas a realizar consecutivamente:

La primera etapa consistió en llevar a cabo los trabajos interpretativos, previa recopilación y análisis de las características físico-geográficas del área de interés, incluyendo cartografía tomada del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) escala 1:50 000. Posterior a ello, se realizó el reconocimiento de campo y muestreo de las unidades geológicas aflorantes de los distintos tipos litológicos.

La segunda etapa consistió en realizar un análisis de los datos y la información recabada en la primera etapa, para poder verificar y comparar los datos que se encontraron en el trabajo

en campo, logrando sintetizar las características tan particulares de la geología y mineralizaciones de la zona de estudio. Finalmente, se integró toda la información obtenida (base de datos geológica, información documental e información de campo) y se realizó la conclusión.

3. Resultados

3.1. Mineralogía

Como señala Montero (1985) la mineralogía del municipio de Temascaltepec consiste en yacimientos ricos en sulfuro de hierro, plomo, zinc y cobre. Dichos sulfuros han sido los más abundantes en la entidad y conforman cerca del 70% en volumen.

Al mismo tiempo, la calcopirita se observa en forma de reemplazamiento en pirrotita y en exsolución con blenda. Cabe mencionar que la galena es de los minerales menos abundantes en la región, aunque está presente en zonas muy particulares. Por otro lado, y en menor porcentaje se reconoce la covelita, bornita y argentita (Colorado-Liévano, 1979).

A su vez, Luna (1988), desarrolló un muestreo que le permitió identificar diversas variedades de cuarzo. 1) Cuarzo blanco: de aspecto masivo, color blanco “lechoso” no presenta bandeamiento. 2) Cuarzo bandeado: tiene diversas tonalidades que varían generalmente de blanco a beige. 3) Cuarzo gris: la mineralización en este tipo de cuarzo es diseminada, en hilos de sulfuros y fragmentos de sulfuros básicos. Mencionar además que, la mineralización de cuarzo también se encontró en fracturas que cortan la estructura y en ocasiones en zonas de oxidación (Figura 6).

Continuando con el análisis Vélez (1986), llevó a cabo un estudio únicamente para los minerales opacos, preparando así superficies pulidas las cuales fueron estudiadas con ayuda de la microscopia y microsonda electrónica. (1) Galeana: presenta una disolución parcial a lo largo de su crucero, acompañada de depósitos de esfalerita. (2) Esfalerita: se observó una textura botroidal que alcanza a medir hasta 500 micras. (3) Pirita: contiene

inclusiones en galena y esfalerita. (4) Hematita: se presenta en finas agujas libres (60%) o incluidas en cristales de pirita. (5) Plata: se identificó en algunas fracturas en donde la percolación del agua es continua. (6) Oro: se reconoce que existe una alta probabilidad de que el oro sea el resultado de un enriquecimiento supergénico.

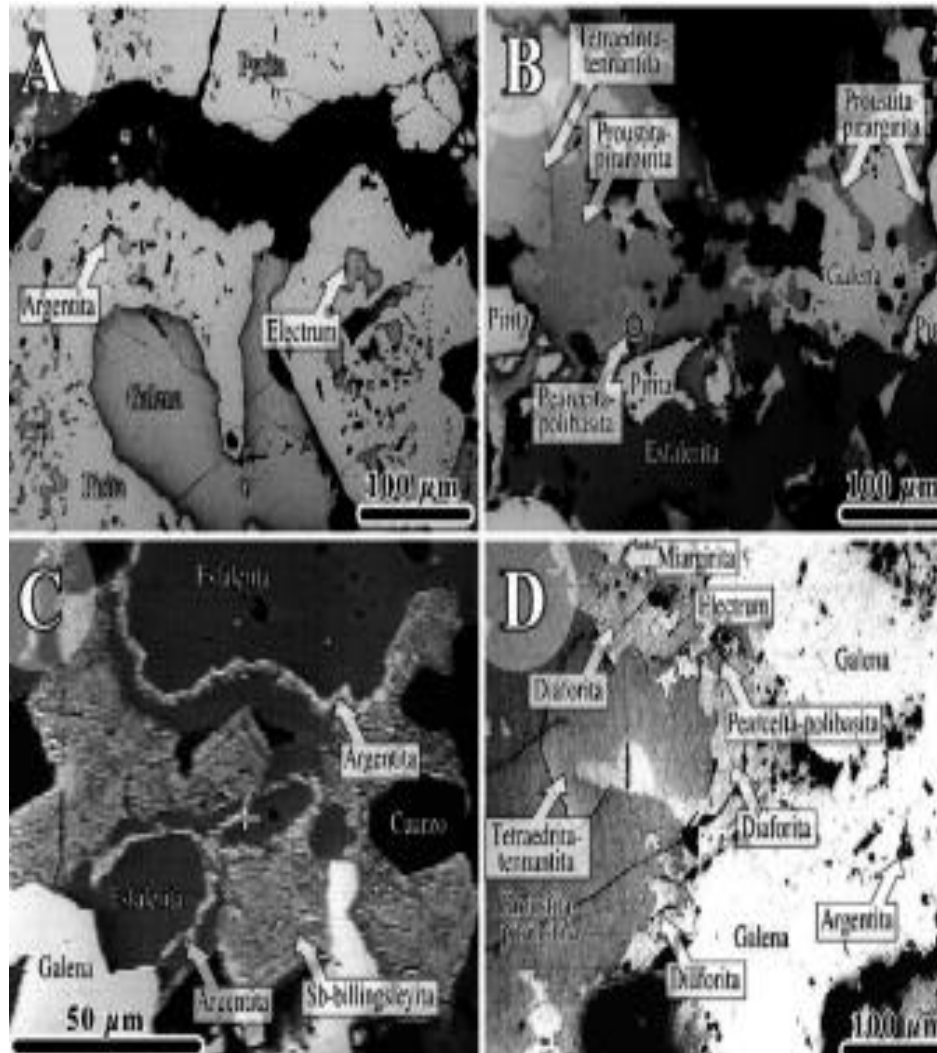


Figura 6. Secciones delgadas donde se observa cuarzo en fracturas y zonas de oxidación.

Fuente: Tomado y modificado de Camprubí y Albinson (2007).

Mientras tanto, Cárdenas y Martínez-Pérez (1947) y García-Rodríguez (1982), mencionan que los minerales con mayor porcentaje predominan en zonas como Real de Arriba y Mina

de Agua, zonas con una alta riqueza en yacimientos, dando lugar a minerales como la argentita, proustita-pirargirita, galena, argenífera, esfalerita, calcopirita, estibina, sulfosales de Ag-Pb, plata nativa y, muy localmente, oro nativo.

Tomando en consideración lo anterior, y tras varios muestreos efectuados, Camprubí (2003) ratificó que ha sido imposible identificar las menas portadoras de plata, sin embargo, se reconoció una asociación que parece estar relacionada con minerales de cobre con contenido en calcosina, pirita, idaita, digenita con cuarzo y calcita con minerales de ganga.

Debido a las limitaciones de los muestreos efectuados por Camprubí (2003) y a la avanzada alteración supergénica desarrollada en la zona, ha sido complejo observar con detalle la mineralogía de la misma, sin embargo, se ha podido encontrar asociaciones primarias que contienen cuarzo, pirita, bornita, calcopirita y calcita, siendo el resto de los minerales producto de la misma alteración (Figura 7).

Del mismo modo, Camprubí (1999) realizó un microanálisis donde pudo determinar por medio de electrones las composiciones químicas de los minerales, se encontraron porcentajes de esfalerita con contenido de calcopirita y argentita, miargirita asociado a proustita-pirargirita, estos últimos se encuentran dentro de los minerales de mena, la serie mineral muestra composiciones de proustita pura y pirargirita casi pura, esta última siendo el más abundante.

Además, se identificó la presencia de tetraedrita argentina-tenantita, su composición general puede considerarse como una mezcla entre freibergita, argentotennantita y giraudita. De igual manera se analizó el contenido en Pb-Ag y Pb, al finalizar este análisis se encontró un greenockita, mineral poco común de baja sulfuración en depósitos epitermales (Camprubí, 1999).

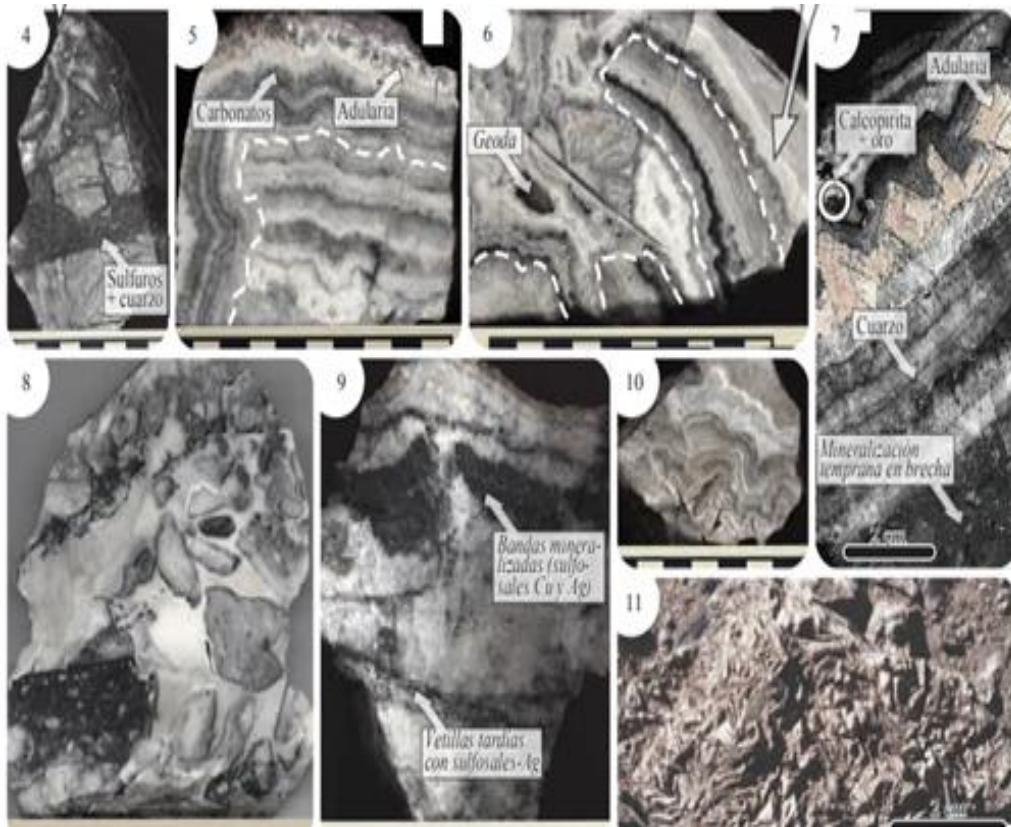


Figura 7. Secciones delgadas donde se observa la presencia de carbonatos, calcopirita y cuarzo en mineralización temprana en brechas y bandas mineralizadas.

Fuente: Tomado de Camprubí (2006).

Llegados a este punto, consideremos ahora el trabajo realizado en campo, en efecto, se encontraron muestras de cuarzo blanco y bandeado megascópicamente, se reconocen micas y óxidos de hierro, donde A y B representan cuarzos bandeados con diversas tonalidades que varían generalmente de blanco a beige en hilos de sulfuros y fragmentos de sulfuros básicos, C y E rocas graníticas y donde D y F presentan un nivel medio de intemperismo con actividad de agentes externos (Figura 8).

Dicho lo anterior, se infiere que estos minerales son el producto de la descarga de aguas hidrotermales en el fondo marino, durante este proceso se reconoció la precipitación de sílice, formándose el cuarzo, el cual cristaliza en primer lugar en los intersticios que se

encuentran entre los minerales, mismos que a través del tiempo y los procesos geológicos fueron modificando sus propiedades físicas y químicas.

Habría que decir también, que existe un alto contenido de calcita, grafito y muscovita, aunque el tamaño de los cristales varía, se entiende que en general van de 0.02 a 0.08 mm, así mismo, se observan fenocristales de feldespato. Es decir, en contraste con la información bibliográfica que hemos leído hasta ahora y el trabajo realizado en campo, se considera que es probable que dichos minerales sean producto de la extrusión de las lavas andesíticas y los procesos que han ocurrido a lo largo de los años en la SMO.

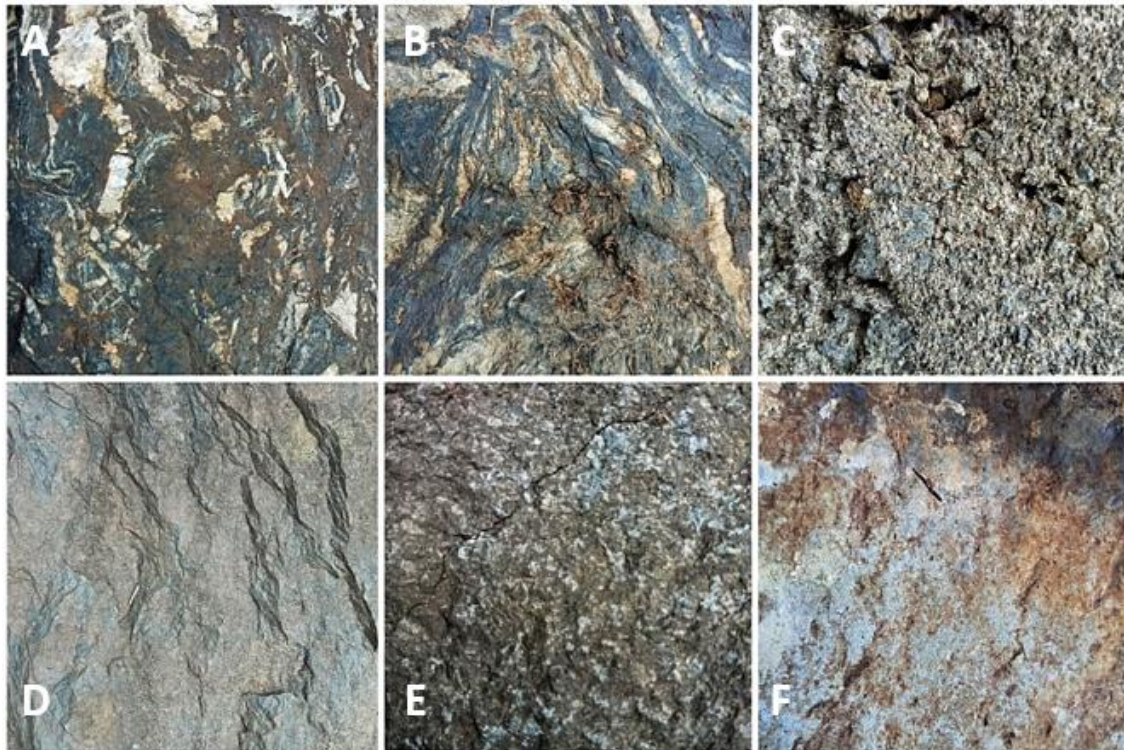


Figura 8. Foto tomada en el afloramiento donde se observan intersticios de cuarzo y grado de intemperismo.

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Estratigrafía

La secuencia vulcanosedimentaria metamorfizada que constituye el municipio, se ha considerado en trabajos previos como de edad Paleozoico Superior, y que simultáneamente parte de esta secuencia pudo haber sido invertida y repetida tectónicamente antes del metamorfismo (Parga, 1981).

Así pues, las rocas expuestas en la entidad forman parte de la secuencia vulcanosedimentaria matamorfizada que afloran en estados como Guerrero, Michoacán y el Estado de México (Campa et al, 1974). La secuencia estratigráfica que compone dichos lugares y que establece el Servicio Geológico Mexicano (SGM) está compuesta por el terreno Teloloapan del Mesozoico.

Dicho lo anterior, en la tabla 2 se presenta una breve descripción de las unidades estratigráficas tomadas de diferentes fuentes citadas en la parte inferior de la citada tabla.

Tabla 2. Representación esquemática de las unidades estratigráficas

Secuencia estratigráfica	
Amatepec Teloloapan Augengneis (Agn)	Esta unidad se encuentra en la parte más baja de toda la secuencia, sobreyacen en forma discordante esquistos cuarzo-feldespáticos y en menor proporción también le cubren filitas gráficas y esquistos de muscovita-clorita.
Formación Andao Esquito Cuarzo- Feldespático (Eqm)	Esta unidad sobreyace en contacto discordante al Augengneis (Agn) y le sobreyacen concordante y gradualmente esquistos de muscovita-clorita-granate y filitas gráficas.
Filitas Temascaltepec	Conjunto de filitas gráficas de más de 2 000 m de espesor con esquistos de clorita-granate, junto con los basaltos del Cuaternario. La sobreyacen de manera concordante esquistos de clorita-muscovita (Esquistos Campanario) y en forma discordante limolitas, conglomerados, tobas y brechas tectónicas del Terciario (Grupo Balsas).
Esquito de Biotita y Tremolita Actinolita (Ebta)	Esta unidad se encuentra en forma de cuerpos lenticulares de unos metros hasta cerca de 500 m de espesor. Afloran principalmente en el río Temascaltepec y se originaron a partir de tobas de composición intermedia a básica depositadas en un ambiente marino.
Esquito Campanario (Ec)	Constituido por un paquete de 1,500 m de espesor de gran heterogeneidad litológica que comprende principalmente esquistos de clorita-muscovita-biotita y se encuentran intercalados con filita gráficas y metacalizas.
Metafelsitas (Mf).	Consiste en un paquete de rocas volcánicas de composición riolítica que se encuentra afectado por metamorfismo de bajo grado (facies de esquisto verde), el origen de estas rocas presenta eminencia volcánica, emplazadas en un ambiente marino.

Filitas gráficas y sericíticas (Fgs)	Estas filitas gráficas (Fgs) sobreyacen en forma concordante Metacalizas (Mcz) y hacia el oriente de la mina Santa Rosa en forma alternante esquistos verdes (Evll), en ambas localidades las filitas sobreyacen en aparente discordancia a Metafelsitas, su espesor varía entre 20 y 190 m.
Esquistos Verdes El Llano (Evll)	El espesor máximo de esta unidad es de 400 m, estos esquistos sobreyacen en forma alternante a las filitas gráficas y sericíticas. El origen surgió a partir de tobas híbridas que se depositaron entre los sedimentos pelíticos y lodos calcáreos.
Filitas gráficas y calcáreas (Fgc)	La secuencia está constituida por rocas de color gris a gris oscuro, dependiendo del contenido de grafito, en bandas intercaladas con bandas de sericita y granos xenoblásticos de cuarzo con un espesor de 20 a 200 m.
Formación Mexicala Metacalizas (Mcz)	Esta unidad aflora en dos franjas uniformes con rumbo NW-SE; está constituida por metacalizas de color gris oscuro foliadas y recrystalizadas, con filitas calcáreas hacia el basamento. Se identificaron procesos de intemperismo puesto que presentan un color gris claro sin perder su compacidad.
Formación Amatepec (Kia)	Secuencia de calizas con intercalaciones de estratos delgados de grauvacas y areniscas calcáreas, presentan un metamorfismo de bajo grado a muy bajo grado (de facies de esquistos verdes a anquimetamorfismo) el espesor máximo es de 400 m.
Formación Xochipala Miembro Inferior (Rv)	Constituido por un conjunto de rocas volcánicas de composición intermedia débilmente metamorfoseadas, con un grosor de más de 300 m de espesor, en ocasiones presentan estructura brechoide y horizontes de lavas almohadillas.
Formación Xochipala, Miembro Superior (Ksxs)	Está conformado por calizas negras en estratos delgados con intercalaciones de limolitas y lutitas calcáreas, afectadas por metamorfismo de muy bajo grado con un espesor aproximado de 800 m.
Formación Xochipala Andesitas Cretácitas (Kand)	Son cuerpos que principalmente se observan en forma concordante a la foliación (sills) de las rocas que los encajonan, se han reconocido principalmente por los diferentes barrenos con diamante efectuados en las áreas de Tizapa y Santa Rosa.
Formación Arcelia (Ksm)	Formada a partir del Cretácico Superior, constituye un conjunto de andesitas basálticas con estructuras en almohadilla, con intercalaciones de limolitas y lutitas principalmente hacia la cima y con algunos intervalos de calizas impuras en estratos delgados.
Formación Balsas (Gb)	Formada por calizas lacustres, conglomerados, brechas, areniscas, limolitas, lutitas, lavas y tobas andesíticas de edad Eoceno-Oligoceno, estas rocas se caracterizan porque forman arroyos con valles en forma de "U" de 15 a 20 m de profundidad.
Formación malpaso Rocas Ígneas Intrusivas (Adamellita, Granito y Diorita)	Son parte de un gran tronco de composición ácida de edad Terciario Inferior, probablemente del Oligoceno, con un contenido de granito al NE, de adamellita hacia el SW y con variaciones de diorita más hacia el occidente.
Rocas Ígneas Extrusivas	Compuesto por un gran volumen de rocas volcánicas de composición riolítica, variando su estructura desde riolita fluidal, tobas, vitrófidos, ignimbritas y lavas, diques de dolerita, andesitas y basaltos, manifestados principalmente como derrames de lava.
Sedimentos Lacustres y Conglomerados (Slc)	El espesor de estos depósitos continentales varía de 6 a 20 m, de edad Plioceno-Pleistoceno, afloran exclusivamente al norte de la mina Tizapa, comúnmente podemos encontrar arenas, arcillas, aglomerados, tobas y conglomerados con fragmentos de riolita, andesita y basalto.

Fuente: Tomado y modificado de Fries (1957), Campa (1979), Parga (1981), Elías (1981), Cserna (1985) y Montero (1985).

ERA	PERÍODO	EPOCA	ZACAZONAPAN TEMASCALTEPEC	HUETAMO	AMATEPEC TELOLOAPAN	HOJA CUERNAVACA	
Cuaternario	Pleistoceno			Aluvion	Aluvion y basaltos	Aluvion basaltos chichinautzin	
	Plioceno		Aluvion y basaltos y And. Basálticas, sedimentos lacustres y conglomerados			Formación cuernavaca and. Zempoala	
Terciario	Mioceno		Tobas ignimbríticas y lavas riolíticas	Serie volcánica characharando	Riolitas, andesitas y tobas	And. Tepoztlan	
	Oligoceno		Adamellita granito			Riolita tilzapotla	
	Eoceno		Andesitas grupo balsas	Grupo balsas	Grupo balsas	Grupo balsas	
	Paleoceno						
Cretácico	SUPERIOR	Damiense					
		Maastrichtiense					
		Campaniense	Formación malpaso	Formación malpaso	Formación malpaso	Formación Mexicala	Formación Mexicala
		Santoniense					
	INFERIOR	Coniaciense	Formación Xochipala		Formación Xochipala	Formación Cuautla	
		Turonense					
		Cenomaniense					
		Albiano	Formación Amatepec	Formación morelos	Formación Amatepec Fm. Morelos	Formación Morelos	
		Aptiano					
Neocomiano	Metacalizas	Formación San Lucas					
Jurásico	Sup.		Filitas grafiticas esquistos verdes filitas grafiticas esquisto campanario F. Temascaltepec, cuarzo	Formación Andao			
	Inf.				Roca verde taxo viejo		
Triásico							
Paleozoico					Esquisto Taxco		
	No deposito						

Fuente: Tomado y modificado de Parga (1959).

60

la subprovincia Cuenca del Balsas, misma que se localiza en la zona y sobre la porción sur de la entidad.

De ahí que, CONAGUA (2024), realizó un mapa de la extensión territorial del acuífero ubicado en el municipio de Temascaltepec, mismo que sirve como base para nuestro análisis y que además identifica las rocas más antiguas de esta provincia, en efecto y para ilustrar mejor, indica el ultimo evento volcánico de la región donde se encuentran los derrames del cuaternario compuesto por basaltos y andesitas (Figura 10).

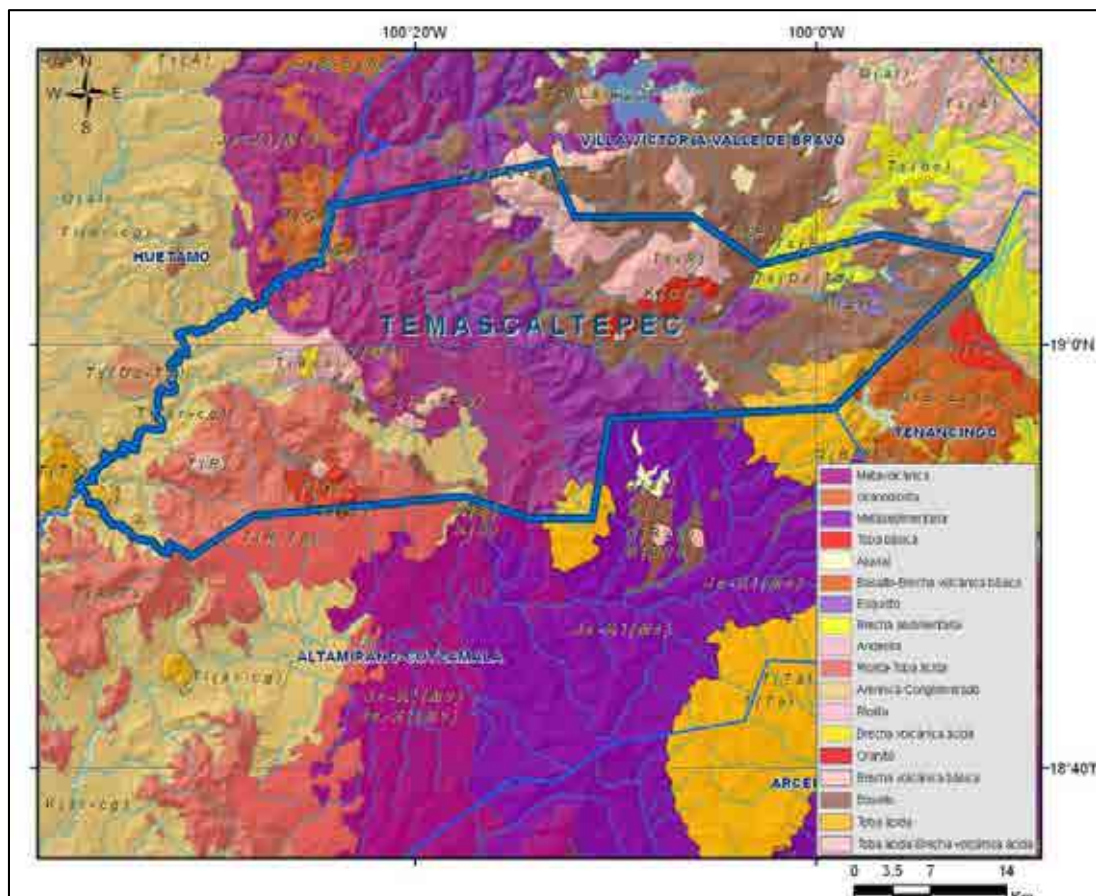


Figura 10. Mapa territorial del acuífero correspondiente al municipio de Temascaltepec.

Fuente: Tomado de CONAGUA (2024)

Así que, como resultado del trabajo de campo, se observa que las calizas y areniscas metamorfoseadas subyacen en forma alternante a lavas andesíticas, se encuentran

fuertemente plegadas mostrando numerosos micropliegues, así mismo, presentan fracturamiento y pequeñas fallas por rompimiento, donde A, B y C muestra un paquete de rocas volcánicas de composición riolítica que se encuentra afectado por metamorfismo de bajo grado (Figura 11).

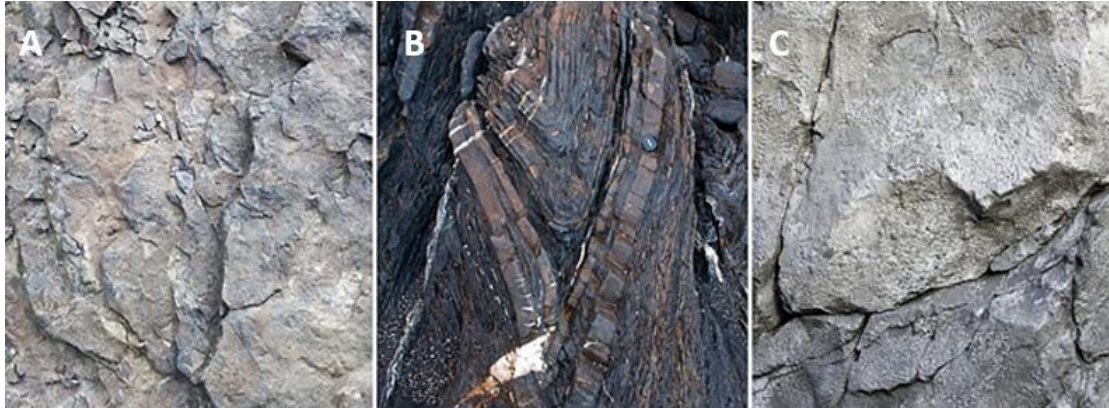


Figura 11. Micropliegues en afloramientos.

Fuente: Elaboración propia

Del mismo modo y una vez comprobado con trabajo de campo, se infiere que la actividad ígnea submarina vuelve a tener lugar en el Cretácico Superior, siendo la composición andesítica la que más prevalece en la zona, es por ello el contacto alternante con los sedimentos calcáreos a los que sobreyace y las estructuras en forma de pillow-lava que se observa en estas rocas.

Todo esto parece confirmar que la secuencia data del Paleozoico Superior, sin embargo, es necesario destacar que las rocas que conforman esta secuencia no son principalmente metamórficas, como resultado previo del trabajo en campo, se identificó que afloran rocas sedimentarias volcánicas en donde la mayoría solo están nombradas unidades litoestratigráficas, en definitiva, sería importante identificar a mayor detalle dichas unidades que podrían funcionar como investigaciones futuras.

3.3. Petrografía

Por otro lado, Montero (1985), se dio a la tarea de describir petrográficamente la zona de estudio, constatando de manera comprobable a través de fotomicrografía y análisis bajo el microscopio petrográfico los resultados obtenidos. Los minerales que se reconocen principalmente son: feldespato potásico, cuarzo y plagioclasa en forma de porfidoclastos, que se encuentran alineados en una matriz milonítica de cuarzo, biotita, muscovita y minerales arcillosos. En las láminas delgadas se observa porfidoblastos de 1 mm a 5 cm de microclina y pertita, y la matriz que los compone está conformada por bandas orientadas de granos xenoblásticos de cuarzo (25%) feldespatos (20%) con variaciones de filosilicatos (10%). Como parte de los minerales accesorios se observan pirita, marcasita, apatita, zircón, epidota y minerales arcillosos.

Con respecto a los esquistos verdes, los minerales reconocidos son cuarzo, feldespatos, óxidos de hierro y micas formando una sola foliación, son de color gris claro muy compactos, algunos suelen tomar otra tonalidad debido al intemperismo al que estuvieron expuestos. Este tipo de rocas presentan una textura esquistosa formada por bandeamiento de cuarzo (0.05-1mm), feldespatos (1.15mm) y micas (0.1-2mm), algunos de sus cristales están alargados formando bandas orientadas paralelas a los filosilicatos (Figura 12).

Por lo que se refiere a las filitas gráficas, son rocas de color gris mediano a negro con lustre satinado de poco a medianamente compactas, con una excelente foliación, las filitas suelen cambiar de color dependiendo del grado de intemperismo que presenten, se observan bandas de cuarzo de unos milímetros hasta 50 cm, bajo el microscopio petrográfico muestran una textura esquistosa con doble foliación, se pueden reconocer: grafito, cuarzo, muscovita, óxidos de hierro y pirita (Montero, 1985).

En cuanto a los esquistos con biotita y tremolita-actinolita, Montero (1985) los describe como rocas de color verde a verde oscuro muy compactas, generalmente contienen pirita o pirrotita diseminada (Figura 13). Los esquistos de biotita consisten en porfidoclastos de

plagioclasas (0.2-2mm) rodeados por una matriz foliada, constituida principalmente por granos de cuarzo (0.01-0.1mm) y cristales de clorita (0.01-0.05mm). El cuarzo (30-60%) se observa en mosaicos granoblásticos formando bandas junto con la muscovita.

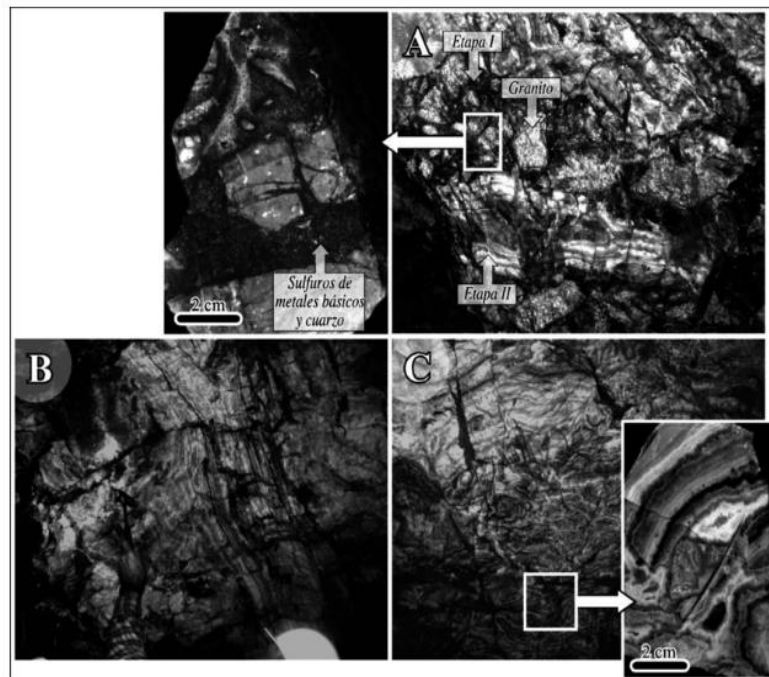


Figura 12. Rocas graníticas encanjonantes con presencia de cuarzo en láminas delgadas.

Fuente: Tomado y modificado de Camprubí y Albinson (2006)

En lo que corresponde a las metacalizas, megascópicamente presentan una textura esquistosa compuesta de cuarzo, muscovita y óxidos de fierro, son rocas muy compactas de color blanco grisáceo y gris claro con zonas de silicificación, solo se observa una foliación y un crucero de fractura, microscópicamente, está constituida principalmente por bandas de cristales xenoblásticos de cuarzo (30-65%) con extinción ondulante, intercalaciones de bandas de muscovita (20-40%) y escasos porfidoblastos de albita (5%), en menor proporción se reconoce pirita, zircón, leucoxeno y hematita.

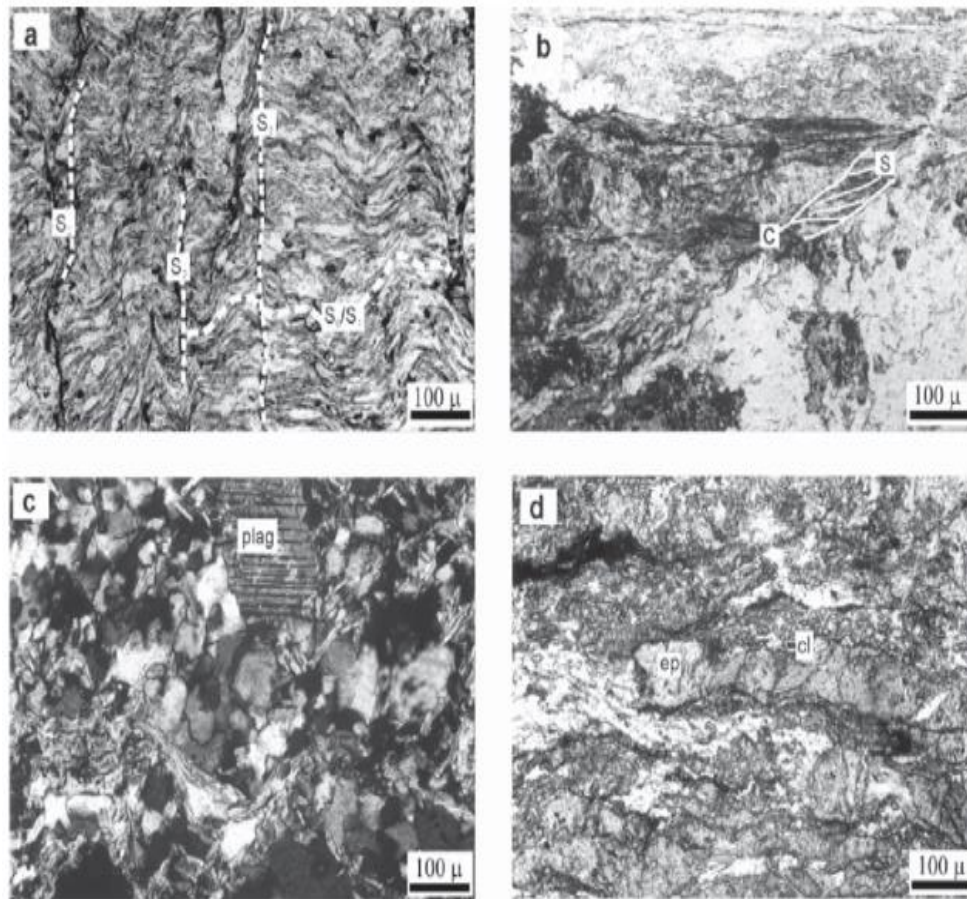


Figura 13. Esquisto muscovítico-clorítico con estructuras planares en láminas delgadas.

Fuente: Tomado y modificado por Montero (1985)

Sobre las calizas que se hallan en la Formación Amatepec son rocas de color gris oscuro, foliadas y recrystalizadas, se reconocen en estratos delgados generalmente plegados con un crucero de fractura asociado a dicho plegamiento y cruzadas en diferentes direcciones por calcita y cuarzo de segregación, se pueden identificar calcita, cuarzo, pirita, minerales arcillosos y materia carbonosa, al microscopio se observan bandas de caliza con algunas bandas de óxidos de fierro.

Por otra parte, el miembro inferior correspondiente a la Formación Xochipala consta de una roca compacta de aspecto arenoso de color verde pistache a gris verdoso, su textura es

porfídica, se observan fenocristales de cuarzo (0.1-2 mm) y plagioclasas (0.1-3 mm), presenta contenido de calcita y pirita fina. Microscópicamente, estas rocas están constituidas por restos de agregados semiradiales de microlitos envueltos en una matriz vítrea, siendo la andesina (65%) el mineral principal que contienen.

A su vez, el miembro superior consiste en un conjunto de calizas de color gris medio a negro muy compactas, se presentan principalmente en estratos delgados, intensamente plegados, se observan hilos de calcita en forma paralela y cortando la estratificación y foliación, el contenido de lutitas y limolitas se identifican en estratos muy delgados de 1 a 5 cm de espesor (Figura 14). En general son de color café claro a oscuro, la mineralogía de las calizas de esta formación consiste en caliza micrítica (60-95%), cuarzo (5%) y plagioclasas (0-25%) (Montero, 1985).

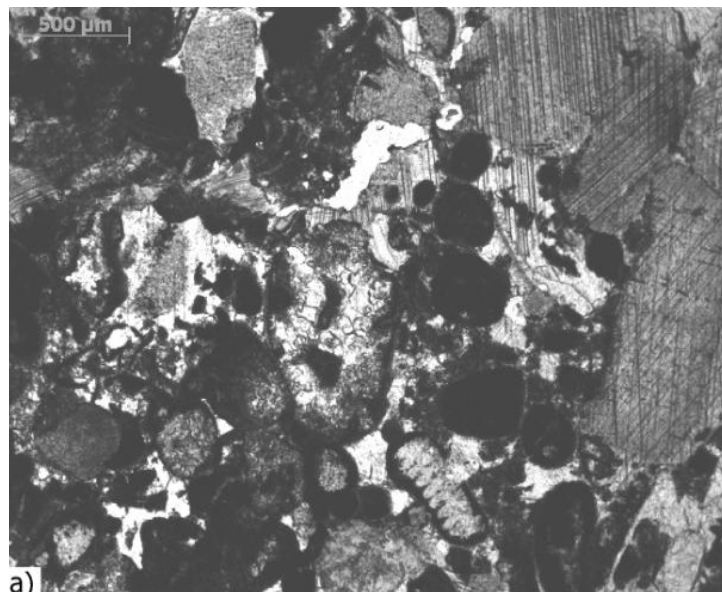


Figura 14. Calizas en estratos intensamente plegados en láminas delgadas.

Fuente: Tomado de Montero (1985).

Se identificaron también brechas de color gris claro de mediana a fuertemente compactas, bajo los efectos del intemperismo adquieren tonalidades amarillentas perdiendo su compactidad. Megascópicamente se observan en las brechas fragmentos de roca angulosos

(de 1 mm a 50 cm) de filitas y en menor proporción cuarzo y feldespatos en una matriz fina. Como menciona Montero (1985) las muestras de secciones delgadas que se tomaron indican un contenido en feldespato potásico en un 10% que van de 1-1.5 mm en tamaño y en cuarzo 4% de 0.7-1.0 mm de diámetro.

Finalmente, Montero (1985) agrega que los depósitos epiclásticos consisten en limos, arenas, conglomerados, tobas y brechas volcánicas. Los limos y arenas son de color café claro, poco consolidados, los conglomerados y brechas volcánicas están constituidos por fragmentos de rocas riolíticas, andesíticas, basálticas y de esquistos y filitas, siendo de composición intermedia y básica.

A pesar de que resultó difícil interpretar a detalle petrográficamente los minerales en campo, fue posible observar megascópicamente cuarzo, muscovita y calizas, generalmente en avanzado estado de intemperización. No se encuentran alteraciones evidentes en los sulfuros a excepción de la oxidación, así mismo, se percibió una textura fina y estructura bandeada, con rasgos de la intervención de agentes externos, en color gris oscuro esfalerita y en amarillo piritita, aunque cabe mencionar que muchas veces el color amarillo se debe al grado de intemperismo que presentan las rocas a través del tiempo, siendo así, A representa toba volcánica con un ligero estado de intemperización, y B y C está compuesto por conglomerados, tobas y brechas volcánicas modificadas por exposición a agentes externos (Figura 15).

Por lo que se refiere a los esquistos verdes que se mencionan en el apartado de Estratigrafía, se debe agregar que se identificaron esquistos de color gris claro muy compactos y bajo los efectos del intemperismo tienden a adquirir un color rojizo, que podría hacernos pensar en otro tipo de litología, como lo son las filitas gráficas.

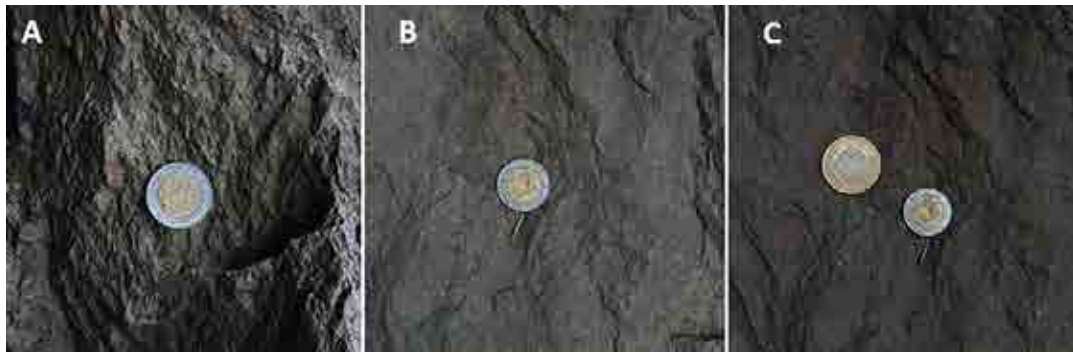


Figura 15. Petrografía megascópicamente.

Fuente: Fotografías tomadas por Stefanni Guadalupe Ruíz Muñoz en fecha 12 de agosto de 2023 (autora).

3.4. Geología estructural

Como plantea Montero (1985) los rasgos más característicos de esta región están constituidos por la Sierra del Peñón y la profunda barranca que ha excavado el río Temascaltepec. Las secuencias mesozoicas sugieren tres episodios de deformación principalmente; las esquistosidades presentan una relación con pliegues isoclinales orientados al NW-SE. En el subterreno Huetamo-Arcelia se identifican estructuras de deformación en su porción basal, mientras que en las porciones superiores sólo presentan pliegues recostados y cabalgaduras.

La deformación frágil se puede observar con presencia de fallas normales de orientación N 40° a 80° E y de N 50° a 80° W. En las secuencias volcánicas cenozoicas las direcciones principales son de N 60° a 90° E, lo cual indica que ocurrió un proceso de compresión en dirección casi subhorizontal con movimientos laterales siniéstrales E-W (CONAGUA, 2024).

En discordancia sobre las unidades mesozoicas se depositan las secuencias volcánicas de la Sierra Madre Occidental ocupando gran parte de la zona centro-oriental. Principalmente se identifican andesitas afectadas por un intrusivo granítico-granodiorítico y en el extremo sureste, aflora una secuencia de conglomerados, areniscas y limolitas correlacionables con la Formación Balsas. Posterior al vulcanismo de la Sierra Madre Occidental se genera el

vulcanismo de la Faja Volcánica Transmexicana distribuido ampliamente en la zona (CONAGUA, 2024).

Por su parte, en la falla del río Temascaltepec se localiza un conjunto de depósitos minerales que se divide en dos bloques desplazados verticalmente, mismos que se piensa que pertenecen a la continuidad de la zona El Coloso hasta Mina de Agua. El sector de Mina de Agua representa el bloque levantado y de formación más profunda en el conjunto de depósitos minerales del distrito, mientras que el sector de El Coloso-La Guitarra representa el bloque hundido, de formación más superficial de los depósitos.

Cárdenas y Martínez-Pérez (1947) documentaron la presencia de más de 30 filones en la zona sureste del distrito de Temascaltepec. Al igual que el conjunto La Guitarra y El Coloso, los filones de la zona de Mina de Agua están relacionados con fracturas de dirección W-E a NW-SE, con longitudes máximas reconocidas de más de 2 km y hasta más de 7 m de potencia (Figura 16).

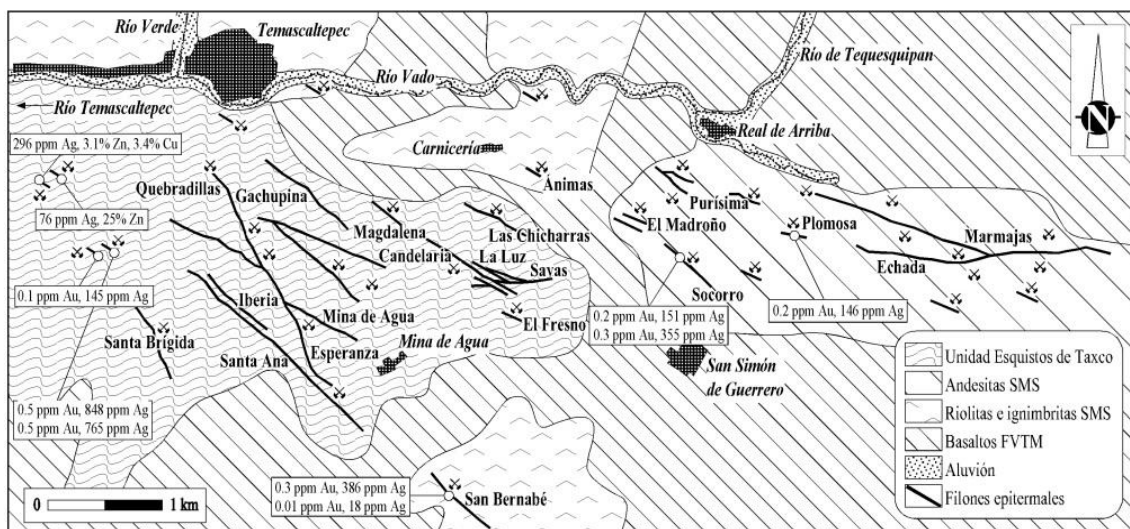


Figura 16. Geología estructural del municipio de Temascaltepec.

Fuente: Tomado y modificado de Cárdenas y Martínez (1947).

Así que, como resultado del trabajo de campo se observaron espesores reducidos de filitas gráficas y su continuidad lateral es muy restringida, cubriendo de forma discordante

brechas tectónicas. El granito es la roca predominante en el yacimiento la Guitarra, es una roca muy compacta, aunque esto depende de la acción de las alteraciones a las que se está expuesta, donde A, B y C, muestran conglomerados, areniscas y limolitas correlacionados con la formación Balsas fuertemente plegados y fallados (Figura 17).



Figura 17. Pliegues localizados en cañón Río Verde, Temascaltepec.

Fuente: Fotos tomadas por los autores, elaboración propia.

Ahora bien, por la naturaleza de la zona de estudio, se considera que presenta una deformación correspondiente a una tectónica superpuesta, en donde se piensa que se llevaron a cabo más de dos etapas de deformación compresiva y deformación distensiva, esto explicaría los conceptos anteriores y las características estratigráficas y mineralógicas que hemos revisado con anterioridad.

3.5. Yacimientos minerales

Según White y Hedenquist (1990), los principales factores que influyen las condiciones físicas de yacimientos minerales corresponden a la geología regional de la zona de estudio, como su estructura, su estratigrafía y la naturaleza de dichas rocas ígneas, además, las características hidrológicas que lo componen y las condiciones de presión y temperatura.

Desde la posición de Moreno (1985) el yacimiento mineral de Tizapa-Santa Rosa, consiste en cuerpos lenticulares de sulfuros masivos bandeados, concordantes con la foliación de

rocas encajonantes, que son filitas gráficas y esquistos de muscovita-clorita en Tizapa y filitas gráficas y calcáreas en Santa Rosa. Por la litología de las rocas encajonantes existe evidencia de que los sulfuros se depositaron en un ambiente geológico marino en una cuenca bajo condiciones reductoras asociada al vulcanismo intermedio, mismo que dio origen a los esquistos explicados con anterioridad.

Asimismo, el yacimiento mineral de La Guitarra, consiste en vetas de cuarzo emplazadas principalmente en el granito y ocasionalmente en brechas tectónicas. Los minerales se encuentran rellenando fracturas en el cuarzo, formando “clavos” con una dimensión vertical de más de 400 m. Las alteraciones hidrotermales observables en el yacimiento son; silicificación, piritización, caolinización, sericitización, cloritización y propilitización.

Ahora bien, dicho en palabras de Camprubí (2003), el distrito de Temascaltepec consta de tres principales zonas con mineralizaciones epitermales de NW a SE: 1) El Coloso 2) La Guitarra 3) Mina de Agua. De acuerdo con el modelo de depósitos epitermales de baja sulfuración de Buchanan (1981), estas tres zonas podrían corresponder respectivamente a la porción superior ($Au > Ag$), media ($Ag > Au$) e inferior rica en metales base (Figura 18).

El sistema Mina de Agua resulta de gran interés en cuanto a la génesis de todo el conjunto de filones epitermales de baja sulfuración comprendidos en el distrito minero de Temascaltepec. En primer lugar, las variaciones económicas destacan que, en comparación con el sistema La Guitarra, se trata de filones con pobres contenidos de oro y altos contenidos de metales base y plata. En segundo lugar, el evento que dio lugar a la falla normal del río Temascaltepec ocasionó la separación de los filones del distrito en dos bloques, mismos que ya se habían explicado con anterioridad (Buchanan, 1981).

Dado lo anterior, Camprubí (2003), pone de manifiesto mediante muestras analizadas la presencia de tres tipos de fluidos en todas las fases de mineralización de los sistemas previamente mencionados: fluidos magmáticos, aguas meteóricas de circulación profunda

y aguas meteóricas superficiales, las muestras presentan relaciones que indican tanto componentes de aguas “andesíticas” como meteóricas.

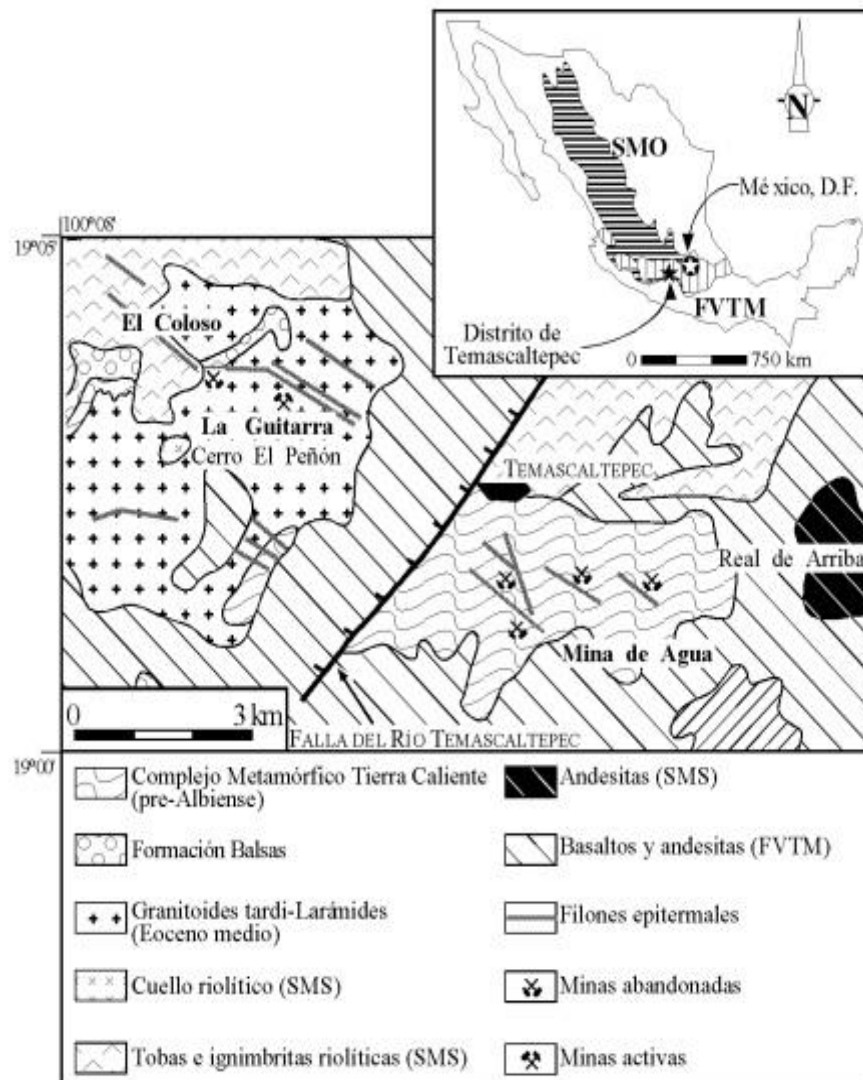


Figura 18. Localización de las mineralizaciones en el municipio de Temascaltepec.

Fuente: Tomado y modificado de Bernal et al. (1980) y González-Partida (1981).

Llegados a este punto y para analizar el trabajo realizado en campo, se observó una brecha con fragmentos de rocas graníticas encajonantes con presencia de cuarzo y en menor proporción amatista, a su vez, se pudo identificar que todas las asociaciones mencionadas

en este apartado, son remplazadas mayormente por minerales secundarios que son más penetrativos en la matriz que en los cristales de la roca, donde la Figura 19A, Figura 19B y Figura 19C muestran cristales de cuarzo relleno de los intersticios de la matriz, sulfuros masivos bandeados. D muestra el grado medio de intemperización en conglomerados. E y F representan rocas graníticas.

Así mismo, al realizar las tomas fotográficas de campo, se infirió que los fenocristales de feldespato potásico fueron parcialmente remplazados por cuarzo microcristalino y observando simultáneamente la veta localizada en La Guitarra, se encontraron asociaciones complejas de sulfuros de metales básicos como minerales metálicos (Figura 19).

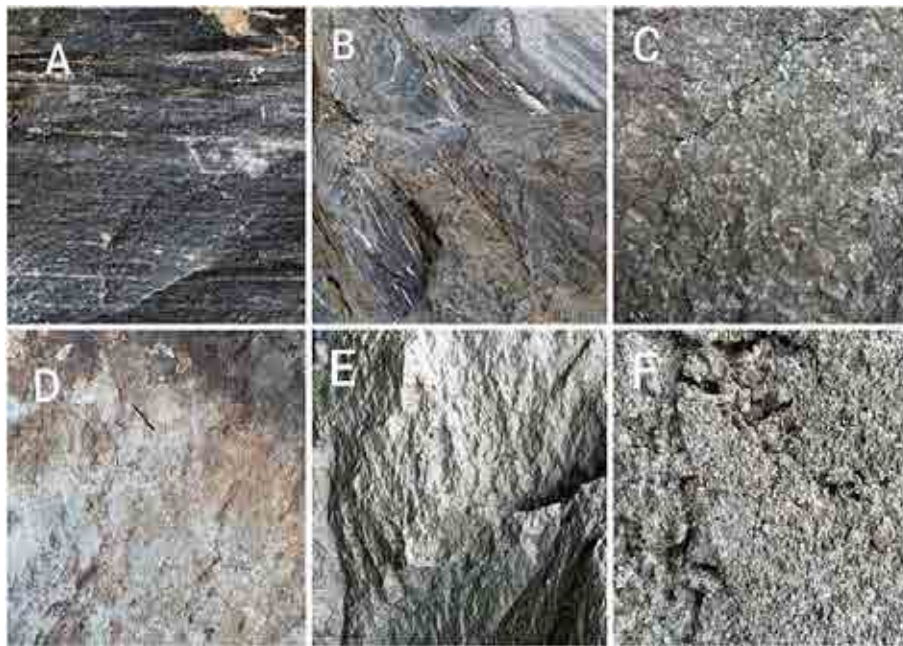


Figura 19. Estratigrafía de yacimientos minerales localizados en el área de estudio.

Fuente: Fotografías tomadas por Stefanni Guadalupe Ruíz Muñoz en fecha 12 de agosto de 2023 (autora).

4. Discusión

Es evidente que el distrito minero atravesó una serie de etapas que responden a los patrones geológicos que se presentan en el territorio, mismos que comparten un vínculo

innegable con los distritos mineros de Guanajuato, Taxco, Zacatecas, Fresnillo y Pachuca-Real del Monte.

Las muestras indican altos contenidos en cuarzo, lo cual evidencia que ocurrió un proceso de vulcanismo y subducción que dieron origen a fluidos magmáticos y aguas meteóricas. Se pone de manifiesto en primer lugar, la existencia de filones hidrotermales, y considerando la presencia de la falla Temascaltepec, la cual, debería de ser uno de los primeros factores a tomar en cuenta para reconstruir la historia geológica, además de los análisis pertinentes.

La litología fue expuesta a temperaturas muy elevadas, por lo que, en contraste con lo investigado años anteriores, se puede inferir que habría que realizar más análisis que nos permitan discriminar procesos geológicos que suscitaron la mezcla progresiva de los fluidos hidrotermales con aguas meteóricas más frías y menos salinas y sí es que hubo una mezcla adicional que se involucró con dichos procesos.

Es posible que los sistemas hidrotermales se hayan formado simultáneamente como respuesta de un mismo sistema, sin embargo, el sistema Mina de Agua representa la parte más profunda de todo el conjunto, por lo que probablemente las características de las asociaciones minerales podrían variar en menor porcentaje.

La distribución de las rocas volcánicas, sedimentarias, los depósitos minerales y el patrón estructural es producto de los eventos de deformación que afectaron rocas terciarias y originaron la morfología actual de la región.

5. Conclusiones

En consecuencia, resulta complejo identificar un distrito minero como lo es el municipio de Temascaltepec, pues dada su importancia en la historia evolutiva ha sido clave fundamental para la reconstrucción geológica de la entidad, no obstante, gracias a los esfuerzos por estudiar esta zona, se han documentado investigaciones que sirven como base para la continuidad de un tema que ha sido más que interesante indagar.

De acuerdo con el análisis y trabajo de campo que se llevó a cabo, se puede constatar que (1) en la mayoría de los eventos, el origen del calor se debe a la existencia de magmas de una profundidad que procede desde el interior de la corteza terrestre (2) la mineralogía que comprende el distrito es el resultado de dichos magmas, mismos que a su vez expulsaron fluidos hidrotermales durante su enfriamiento y cristalización (3) en las regiones en donde los yacimientos conocidos de este tipo son más comunes, se infiere que ocurrieron procesos de subducción, vulcanismo y formaciones que siguen estando activas (y que continúan muy probablemente desde el período Cretácico).

Tomando como referencia lo anterior, es conveniente mencionar que el panorama geológico del municipio es el resultado de las diferentes variedades de yacimientos que cambian de acuerdo con la proximidad a la fuente magmática del calor y el ambiente de mineralización.

El distrito ha transitado por diferentes eventos geológicos dieron origen a características específicas como su mineralogía, petrología, estratigrafía y yacimientos minerales. Sin embargo, y aunque los yacimientos epitermales datan del Paleoceno hasta la actualidad, es muy probable que hayan existido yacimientos más antiguos en la entidad y que no hayan sido descubiertos o que fueron erosionados por completo.

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

6. Referencias

Barraza, C. (2018). Manual para la Presentación de Referencias Bibliográficas de Documentos Impresos y Electrónicos. Obtenido de http://www.utemvirtual.cl/manual_referencias.pdf

Bernal, F., Díaz, R. y García, P., (1980) Informe del proyecto Reserva Minera Nacional Temascaltepec (Au, Ag, Pb, Zn); Municipio de Temascaltepec (1ª. etapa): México, Consejo de Recursos Minerales, Reporte Interno.

- Blanc, N., & Regnaud, H. (2015). ¿La géographie peut-elle être un art plastique comme un autre? *L'Information Géographique*, 79, 97-109. <https://doi.org/10.3917/lig.794.0097>
- Camprubí, A. (1998). Los depósitos epitermales de Ag-Au de Temascaltepec (Estado de México), México [Tesis doctoral]. Universitat de Barcelona.
- Camprubí, A. (2003). Geoquímica de fluidos de los depósitos epitermales del sureste del Distrito de Temascaltepec, Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20(2), 1026-8774.
- Camprubí, A. (2006). Depósitos epitermales en México: actualización de su conocimiento y reclasificación empírica. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 58(1), 1405-3322. <https://doi.org/10.18268/bsgm2006v58n1a2>
- Cárdenas, S., & Martínez-Pérez, F. (1947). Los yacimientos argentíferos de Temascaltepec, Estado de México. *Comité Directivo Para La Investigación de Los Recursos Minerales de México*, 12, 28.
- Clark, K. F., Damon, P. E., Shafi quillah, M., Ponce, B. F., Cárdenas, D., (1981). Sección geológica-estructural a través de la parte sur de la Sierra Madre Occidental, entre Fresnillo y la costa de Nayarit. *Asociación Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, Memoria Técnica XIV*, 69-99.
- CONAGUA. (2010). Región Hidrológica 18 Río Balsas. Recuperado 17 de febrero de 2023, de <https://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php?p=32>
- CONAGUA. (2024). *Documento de disponibilidad del acuífero del Río Cutzamala*. Comisión Nacional del Agua.
- Damon, P. E., Shafi quillah, M., Clark K., (1983). Geochronology of the porphyry copper deposits and related mineralization in Mexico: *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20, 1052-1071
- Damon, P. E., Shafiquillah, M., & Clark, K. F. (1981). Age trends of igneous activity in relation to metallogenesis in the southern Cordillera. *Arizona Geological Society Digest*, 14, 137-154.
- FAO-UNESCO. (1974). *FAO-Soil Map of the World 1: 5 000 000*. Recuperado 14 de diciembre de 2022, de <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/es/>
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., & Bryan, S. (2005b). Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 1405-3322. <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n3a5>
- García, E. (1998). Cartas de Climas, escala 1: 1, 000,000 según el Sistema de Köppen Modificado por García. CONABIO. Recuperado 23 de enero de 2023 de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

- González-Partida, E. (1981). La Province filonienne Au-Ag de Taxco-Guanajuato (Mexique) [Thèse de Docteur-Ingenieur]. Institute National Polytechnique de Lorraine.
- H. Ayuntamiento de Temascaltepec. (2009). Órgano Oficial de Difusión del H. Ayuntamiento de Temascaltepec, México. Gaceta Municipal. Recuperado 04 de febrero de 2023, de <https://www.adabi.org.mx/leyArchivos/TEM35.pdf>
- H. Ayuntamiento de Temascaltepec. (2013). Órgano Oficial de Difusión del H. Ayuntamiento de Temascaltepec, México. Gaceta Municipal. Recuperado 13 de enero de 2023, de <http://temascaltepec.gob.mx/gaceta-municipal-del-presupuesto-2018.html>
- H. Ayuntamiento de Temascaltepec. (2016). Órgano Oficial de Difusión del H. Ayuntamiento de Temascaltepec, México. Gaceta Municipal. Recuperado 29 de enero de 2023, de <https://legislacion.edomex.gob.mx/sites/legislacion.edomex.gob.mx/files/files/pdf/bdo/bdo088.pdf>
- H. Ayuntamiento de Temascaltepec. (2019). Órgano Oficial de Difusión del H. Ayuntamiento de Temascaltepec, México. Gaceta Municipal. Recuperado 03 de enero de 2023, de <https://legislacion.edomex.gob.mx/sites/legislacion.edomex.gob.mx/files/files/pdf/bdo/bdo2019/bdo088.pdf>
- IGECEM, Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México. (2013). Estadística Básica Municipal de Temascaltepec. IGECEM. Recuperado 4 de enero de 2023, de https://igecem.edomex.gob.mx/indole_social
- INEGI. (1975). Carta edafológica escala 1:50 000. Recuperado 19 de febrero de 2023, de <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/#Descargas>
- INEGI. (2001). Conjunto de datos vectoriales fisiográficos. Recuperado 14 de febrero de 2023, de <https://www.inegi.org.mx/temas/fisiografia/>
- INEGI. (2007). Continuo Nacional de Conjunto de Datos Topográficos [Conjunto de datos]. En Información topográfica. <https://www.inegi.org.mx/programas/topografia/50000/>
- INEGI. (2007a). Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM). Recuperado 8 de febrero de 2023, de <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INEGI. (2010). Censo de población y vivienda. Recuperado 04 de febrero de 2023, de <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>
- INEGI. (2020). Censo de población y vivienda. Recuperado 10 de febrero de 2023, de <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- Kaufman, A. M., & Rodríguez, M. E. (1993). La escuela y los textos. Letras, 56(90), 0459-1283. <https://teachingpnieb.files.wordpress.com/2017/05/d2-d3-kauffman-2003-la-escuela-y-los-textos.pdf>
- Montero, A. (1985). Estudio de la geografía volcánica de la región central de México. Revista Mexicana de Geografía, 23(4), 45-59.

- Nast, H. J. (2010). Women in the Field: Critical Feminist Methodologies and Theoretical Perspectives. *The Professional Géographie*, 46. <https://doi.org/10.1111/j.0033-0124.1994.00054.x>
- Pérez Serrano, G. (1994). *Investigación cualitativa. Retos e interrogantes*. (Vol. 1). Madrid: Editorial La Muralla, S.A.
- Sauer, C. O. (1987). *La educación de un geógrafo* (Vol. 1). GEOFUN-EPG.
- SERNANP PERÚ. (2015). *SERNANP QGIS Manual*. Recuperado 12 de febrero de 2023 de <https://sernanppqgis.wordpress.com/2015/08/>
- Sotelo, R., González, A., Cruz, G., Moreno, F., & Cruz, G. (2011). Los suelos del Estado de México y su actualización a la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo 2006. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(8), 2007-1132. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i8.538>
- Tamayo, M. T. (2003). *El proceso de la investigación científica* (4.a ed., Vol. 1). Limusa Noriega Editores. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/227860/El_proceso__de_la_investigaci_n_cient_fica_Mario_Tamayo.pdf

Análisis morfotectónico del territorio circundante a Tijuana, Baja California, México: aportes para la evaluación del peligro sísmico

Morphotectonic analysis of the territory surrounding Tijuana, Baja California, Mexico: contributions for the evaluation of seismic hazard

Juan Carlos Garatachia Ramírez ^{1*}, José Ramón Hernández Santana ², Carlos Isidro Huerta López ³

¹ Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra – Unidad Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México. Cerro de Coatepec, S/N, Toluca, Estado de México. C. P. 50000, gcgaratachiar@uaemex.mx , <https://orcid.org/0000-0003-2603-4770>

² Unidad Académica de Estudios Territoriales de Yucatán, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, 04510, Coyoacán, Ciudad de México, santana@geografia.unam.mx, <https://orcid.org/0000-0002-1375-2776>

³ Universidad de Puerto Rico, Recinto, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Recinto Universitario de Mayagüez, 259 Blvd. Alfonso Valdés Cobián, carlos.huerta@upr.edu, <https://orcid.org/0000-0003-4265-8858>

*Autor de correspondencia

Recibido: 26/11/2024. Aceptado: 06/01/2025. Publicado: 21/01/2025.

Cómo citar: Garatachia Ramírez, J., Hernández Santana, J., & Huerta López, C. (2025). Análisis morfotectónico del territorio circundante a Tijuana, Baja California, México: aportes para la evaluación del peligro sísmico. *Geografía Aplicada*, 1(1), 79-106. Consultado de <https://geografiaaplicada.uaemex.mx/article/view/25621>

Resumen

La ciudad de Tijuana, Baja California, está enclavada en un ambiente tectónico activo que se refleja en la morfología del relieve; múltiples estructuras activas que atraviesan la zona urbana y la amenazan desde su entorno periférico. Dicha situación, aunado a factores, como las condiciones socioeconómicas y el incremento poblacional que prevalece en la ciudad, contribuye a que algunos sectores de la población se encuentren en condiciones de exposición y de vulnerabilidad ante peligros originados o asociados a sismos. Aprovechando las capacidades de las geotecnologías como los Sistemas de Información Geográfica y sus técnicas de análisis espacial y a través del análisis morfotectónico del territorio, se delimitaron 45 unidades, diferenciadas por los índices geomorfológicos de hipsometría, pendiente, densidad de disección, energía del relieve, densidad de morfoalineamientos, y la dirección preferencial de estos. El mapa morfotectónico resultante es una contribución desde la geografía, a los estudios de riesgo sísmico que se realizan en la ciudad, donde la visión que ha dominado es la geológica y geofísica.

Palabras clave: México, Morfotectónico, Riesgo sísmico, Tijuana.

Abstract

The city of Tijuana, Baja California, is located in a geological context of intense tectonic mobility, both regional and local, with a significant seismic activity, manifested in a complex seismotectonic pattern of its relief. Multiple active structures cross its urban area and threaten it from its peripheral surroundings. This situation, coupled with factors such as socioeconomic conditions and the population growth that prevails in the city, contributes to some sectors of the population being exposed and highly vulnerable to hazards originating or associated with earthquakes. Taking advantage of the contributions of geotechnologies, such as Geographic Information Systems and their spatial analysis

techniques, as well as through the morphotectonic analysis of the territory, 45 units were delimited, differentiated by the geomorphological indices of hypsometry, slope, dissection density, relief energy, morphoalignment density, and preferential direction of the disjunctive structures. The resulting morphotectonic map is a contribution from geography to the seismic risk studies carried out in the city, where the vision that has dominated is geological and geophysical.

Keywords: Mexico, Morphotectonic, Seismic risk, Tijuana.

Introducción

La ciudad de Tijuana, Baja California, está enclavada en un contexto geológico de intensa movilidad tectónica, tanto regional como local, y de actividad sísmica significativa, manifestada en un complejo diseño sismotectónico de su relieve. Múltiples estructuras activas atraviesan la zona urbana y la amenazan desde el entorno periférico. En las últimas tres décadas, se han realizado algunas investigaciones sobre la velocidad promedio de desplazamiento de las fallas y su potencial sismogénico, arrojando un mayor peligro sísmico en las fallas *Coronado Bank*, *Agua Blanca*, *Rose Canyon*, *SilverStrand*, *San Miguel*, *Calabazas* y *Vallecitos* (Lindvall *et al.*, 1989; Berger y Schug, 1991; Reichle, 1991; Raines *et al.*, 1991; Cruz, 2002; Ibarra *et al.*, 2009).

Por otra parte, de acuerdo con datos del último censo de población (INEGI, 2020), la ciudad es habitada por 1'922,523 personas y en comparación con el año 2010, la población en Tijuana creció un 23 % (Data México, 2020); dicha situación, en consonancia con otros factores, como las condiciones socioeconómicas, contribuye a que algunos sectores de la población se encuentren en condiciones de exposición y de alta vulnerabilidad ante peligros sísmicos, que repercuten también en la activación de procesos de remoción en masa.

Ante dicho contexto que sugiere escenarios de riesgo de desastre en la zona de estudio, los enfoques que han marcado la pauta de los trabajos cuyo objetivo está relacionado con el análisis de amenazas y riesgos, se pueden clasificar en tres grupos: 1) Análisis y modelación de escenarios de riesgo; 2) Peligros naturales, con énfasis en la sismicidad y sus efectos secundarios y 3) Dinámica socioeconómica y vulnerabilidad.

Destaca el Proyecto RADIUS, caso Tijuana, desarrollado entre 1998-1999 y cuyo objetivo fue evaluar y proponer un escenario de riesgo sísmico para la ciudad; para ello, se estimó la magnitud y la distribución de las intensidades de un sismo hipotético de $M=6.5$, generado a partir del rompimiento de la Falla La Nación (Rosquillas y Mendoza, 2002). También se desarrolló una propuesta de escenario sísmico en Tijuana, por parte del Colegio de la Frontera Norte, en el marco del desarrollo del Sistema de Información Geográfica y Estadística de la Frontera Norte (SIGEF) (Winckell *et al.*, 2000). Otro de los aportes que se han realizado para el análisis del peligro sísmico en la ciudad, son las microzonaciones sísmicas, enfocadas a la estimación de los períodos dominantes del suelo, las velocidades de propagación de ondas de cortes y la aceleración pico horizontal, por citar algunos parámetros. (Ibarra, 2004; Acosta *et al.*, 2009, 2009). Asimismo, estudios orientados a analizar los procesos geológico-geomorfológicos de escala local, por ejemplo, movimientos de ladera (Delgado-Argote *et al.*, 2017). Por su parte, Garatachia *et al.* (2016) realizaron una aproximación a la vulnerabilidad estructural antes sismos, la cual fue calculada a partir de la identificación de la región de respuesta máxima, misma que considera las frecuencias de vibración del terreno y de las edificaciones.

A partir de la perspectiva general de la zona de estudio y principalmente en términos de sus características físico-geográficas y su formación geológica es necesario contar con estudios que muestren el comportamiento espacial del proceso sísmico y sus repercusiones directas sobre el sistema social expuesto. Pero también, resulta fundamental el conocimiento y la caracterización de morfoestructuras y principales rasgos morfotectónicos presentes en el relieve, como expresión superficial de la geodinámica y como fuente de peligro.

El presente trabajo aprovecha las capacidades de las geotecnologías como los sistemas de información geográfica y técnicas de análisis espacial, para el procesamiento y representación de datos morfoestructurales y morfométricos, y persigue los objetivos siguientes: a) describir las principales características morfométricas y morfotectónicas del relieve, (b) identificar y delimitar los principales tipos de morfoestructuras y realizar una clasificación tipológica; y (c) proponer las principales morfoestructuras con actividad

geodinámica en el contexto de la ciudad de Tijuana, como aporte para trabajos relacionados con el riesgo sísmico.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

La ciudad de Tijuana se localiza al noroeste del estado de Baja California; colinda al norte, con el condado de San Diego, Estados Unidos de América; al este, con el municipio de Tecate; al sur, con el municipio de Ensenada; y al oeste, con el municipio de Playas de Rosarito y el Océano Pacífico (Figura 1). El área de estudio representa un polígono comprendido entre los 32° 18' 51.5" y los 32° 40' 12.6", de latitud norte, y entre los 116° 32' 36.2" y 117° 22' 46.1", de longitud oeste, con un eje norte-sur de 14 km y de 25 km, en dirección este-oeste a la ciudad, al noroeste del estado de Baja California.

La evolución geológica de esta región ha estado determinada por los desplazamientos de apertura entre la placa tectónica Norteamericana y las placas oceánicas adyacentes (Michaud *et al.*, 2005). Gastil *et al.* (1975) plantean la ocurrencia de dos eventos principales: (a) evento del Mesozoico medio, con una duración desde el Jurásico hasta la mitad del Cretácico, representado por estratos volcánicos, arcos de islas, metamorfismo regional y emplazamiento de rocas graníticas y (b) evento del Cenozoico medio, compuesto por la acumulación de una amplia variedad de rocas volcánicas, disminución del metamorfismo, el emplazamiento de materiales graníticos y la creación del Golfo de California, considerado como un cinturón tectónico móvil. Este evento inició durante el Mioceno temprano y continúa en la actualidad. Las características litoestratigráficas que se muestran en la Figura 1, se obtuvieron mediante una compilación de información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (1976), del Servicio Geológico Mexicano (2003), y de Todd (2004), Kennedy y Tan (2008).

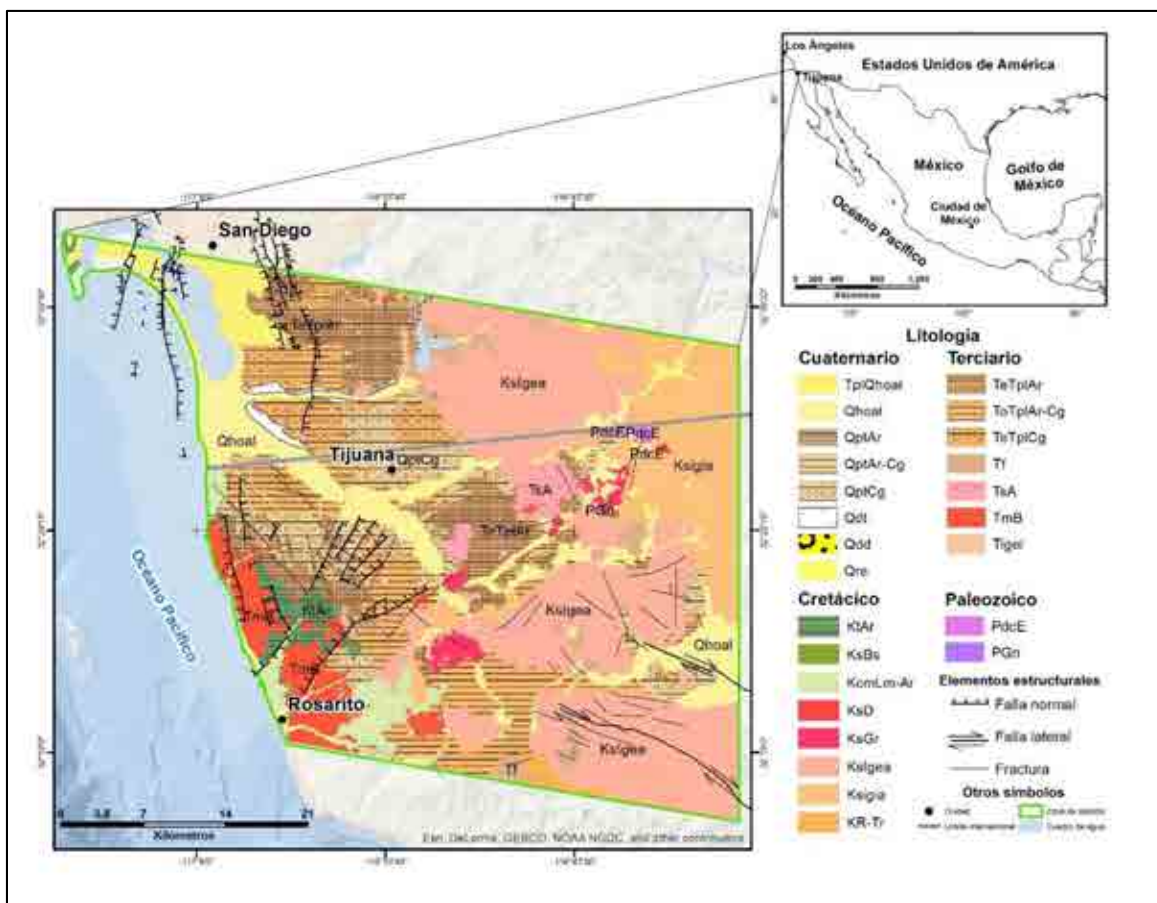


Figura 1. Área de estudio y constitución geológica. Cuaternario: Aluvial antiguo (TplQhoal), Aluvial reciente (Qhoal), Arenisca (QptAr), Arenisca-conglomerado (QptAr-Cg), Conglomerado (QptCg), Depósitos en terrazas (Qdt), Depósitos de deslizamiento (Qdd), Residual (Qre). Terciario: Arenisca (TeTplAr), Arenisca-conglomerado (ToTplAr-Cg), Conglomerado (TeTplCg), Fanglomerado (Tf), Andesita (TsA), Basalto (Tmb), Ígnea extrusiva intermedia (Tigei). Cretácico: Arenisca (KtAr), Brecha sedimentaria (KsBs), Limolita-arenisca (KcmLm-Ar), Diorita (KsD), Granito (KsGr), Ígnea extrusiva ácida (Ksigea), Ígnea intrusiva ácida (Ksigia), Riolita-Toba riolítica (KR-Tr). Paleozoico: Esquistos (PdcE), Gneis (PGn).

Fuente: elaboración propia, con base en las fuentes citadas en Instituto Nacional de Estadística y Geografía (1976), del Servicio Geológico Mexicano (2003), y de Todd (2004), Kennedy y Tan (2008).

2.2. Materiales y métodos

Análisis estructuro-geomorfológico

Con la finalidad de contar con más elementos para el análisis morfoestructural del relieve, se desarrollaron los siguientes mapas morfométricos: hipsométrico, inclinación de las superficies y laderas del terreno, energía del relieve y densidad de disección; se considera que dichos productos brindan información fundamental para comprender la relación entre las geoformas y las características litológicas con los procesos, principalmente endógenos, que actúan sobre las mismas.

El mapa hipsométrico, o también llamado altimétrico, representa el inicio del análisis morfométrico. El objetivo de dicho mapa es expresar, de forma clara, los diferentes niveles o pisos altitudinales del relieve, mediante la agrupación de los valores de altitud en intervalos discretos. Esto permite identificar unidades mayores y posteriormente definir categorías (montañas, lomeríos y llanuras) y subcategorías del relieve (montañas altas, media, bajas, premontañas; lomeríos altos, medianos, bajos; llanuras muy altas, altas, medianas, bajas y muy bajas), mientras que en el plano morfotectónico facilita la delimitación de morfoestructuras regionales y ejes estructurales.

La expresión cartográfica fue desarrollada con un Modelo Digital del Terreno (MDT) del sensor ALOS-PALSAR con resolución espacial de 12.5 m. A partir del método de clasificación cortes naturales se realizaron cinco pruebas de clasificación de los valores de altitud, es decir, 5, 7, 10, 12 y 14 rangos; con base en esto y bajo un criterio geomorfológico se seleccionó la agrupación en 12 clases, ya que proporciona mayor nivel de detalle y diferenciación de los rasgos topográficos, en especial en zonas de llanura, donde las diferencias de altitud son sutiles.

Otro procesamiento permitió obtener el mapa de pendientes, como variable sobre la inclinación del terreno. Con ello es posible identificar y analizar los procesos modeladores del relieve, las morfologías resultantes y su relación con la constitución geológica, en términos de las características litológicas y estructurales.

Desde un punto de vista analógico, el cálculo de esta variable consiste en transformar las distancias entre curvas de nivel en valores de pendiente; lo anterior resulta de dividir la diferencia altitudinal de dos puntos entre la distancia horizontal, obteniendo como resultado la tangente del ángulo, misma que se puede transformar a grados al calcular su inversa o a porcentaje al multiplicarla por cien (Lugo, 2015). La expresión matemática del cálculo de la pendiente es la siguiente:

$$\tan\alpha = dy/dx$$

Donde:

$\tan\alpha$ = inclinación del terreno

dy = Diferencia en la vertical

dx = Distancia horizontal

Dicho cálculo se realizó en ambiente de Sistema de Información Geográfica (SIG), mediante la manipulación del (MDT), al cual se le aplicó el algoritmo denominado *Slope*, cuyo funcionamiento es el siguiente: para cada celda de procesamiento, la herramienta calcula el máximo cambio en elevación sobre la distancia entre esta y sus ocho vecinas, con ello identifica el descenso cuesta abajo más inclinado desde la celda central.

Al considerar que la zona se caracteriza por un relieve complejo, es decir, se alternan superficies niveladas y elevaciones montañosas (Lugo-Hubp, 1988), se realizaron diversas pruebas de clasificación de los valores de pendiente con la finalidad de diferenciar la morfología del terreno de la forma más detallada posible, en especial en las zonas de llanura. Los intervalos seleccionados fueron 0°-4°, 4.1°-6°, 6.1°-8°, 8.1°-10°, 10.1°-14°, 14.1°-20°, 20.1°-25°, 25.1°-35° y mayor de 35°.

Por otra parte, la disección causada por agentes exógenos forma parte de los denominados procesos morfogenéticos del relieve (Lugo-Hubp, 1988) por lo cual, en términos de su tipo y magnitud refleja la evolución del mismo; se trata de un proceso que depende de factores como la estructura geológica, relieve, clima, cubierta de suelo y vegetación, entre otros (Lugo, 2015); desde el enfoque estructuro-geomorfológico, el análisis de la densidad de

disección y las características geológicas del territorio es fundamental, ya que esto permite identificar las relaciones existentes entre la resistencia de los materiales, la presencia de estructuras de debilidad, y la distribución espacial y frecuencia de las corrientes fluviales.

Desde el punto de vista metodológico, un mapa de densidad de disección del relieve se obtiene mediante la medición de la longitud total de todos los *talwegs* (km) dividida entre la superficie analizada (km²) (Lugo-Hubp, 1988). En este tenor, la zona se subdividió en dos mapas topográficos a escala 1: 60 000, con equidistancia entre curvas de nivel de 20 m; sobre dicha base se infirieron y trazaron las corrientes fluviales, las cuales además fueron jerarquizadas mediante el método de Strahler (1957). Posteriormente, se procedió a digitalizar las cartas y se manipularon en ambiente de SIG, donde fueron georrefenciadas y vectorizadas para obtener la longitud de cada cauce; cada uno de dichos valores fueron vinculados a celdas de 1 km², de las cuales se obtuvo el centroide geométrico para su interpolación, mediante el método IDW (*Inverse Distance Weighting*). Con ello, se obtuvieron isolineas y para efectos de una representación continua de la densidad de disección fue aplicado el método de remuestreo *Bilinear Interpolation*, obteniéndose un mapa que agrupa los valores de densidad de disección en las siguientes clases (km/km²): < 1, 1.1-2, 2.1-3, 3.1-4, 4.1-6 y 6.1-8.0.

Para la interpretación del mapa los valores de densidad de disección se agruparon de la siguiente forma: valores altos (4.1-8.0 km/km²), valores medios (2.1-4.0 km/km²) y valores bajos (<1-2.0km/km²).

El siguiente indicador morfométrico calculado fue la energía del relieve, parámetro que muestra la diferencia máxima de altura en un determinado espacio; algunos conceptos equivalentes son los de disección vertical o profundidad de disección (Hernández *et al.*, 2017). En sentido formal, hace referencia a la amplitud de las variaciones altimétricas en metros por unidad de área, entre las cimas y el fondo diseccionado (Spiridonov, 1974, 1982, en Hernández *et al.*, 2017).

De acuerdo con Lugo-Hubp (1988), la energía del relieve expresa la intensidad relativa de la actividad endógena en relación con la exógena, en este sentido, los valores altos de este

parámetro se pueden interpretar como mayor actividad tectónica y viceversa. Con base en lo anterior, en la actualidad el uso de los métodos morfométricos se ha extendido a diversas aplicaciones entre las que destacan, el estudio de deformaciones tectónicas y la búsqueda de desplazamientos activos en estructuras, como fallas (Hernández *et al.*, 2017).

El método tradicional para la elaboración de un mapa de energía del relieve consiste en la división de la zona en celdas geométricas del mismo tamaño, en cada una de ellas se resta la altitud mínima de la máxima para obtener la diferencia en metros y dicho valor es asignado a la celda, el cual posteriormente es interpolado. Bajo este principio, se generó una matriz de celdas de 1 km² y en cada una fue calculada la diferencia altimétrica mediante curvas de nivel con equidistancia de 20 m. El valor resultante fue asignado a la celda correspondiente, de la cual se obtuvo el centro de gravedad, con el fin de realizar operaciones de interpolación; después de probar distintos algoritmos de predicción de valores (*Krigging*, *Nearest Neighbour* e *IDW*), se optó por el método *Inverse Distance Weighting* (*IDW*) y los datos resultantes se agruparon en siete intervalos (0-20 m, 20.1-60 m, 60.1-100 m, 100.1-200 m, 200.1-300 m, 300.1-400 m, 400.1-500 m y 500.1-600 m), ya que de esta forma se reflejan, con mayor detalle las diferencias altitudinales.

Análisis morfotectónico del relieve

Para este análisis, se aplicaron los métodos siguientes: a) interpretación hipsométrica, a escala 1: 50 000; b) análisis de los morfoelementos lineales del relieve, con el fin de complementar los sistemas de fallas, compilados de otros autores, como Gastil *et al.* (1975), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (1976), Cruz (2002), *United States Geological Survey* (2006) y Moro Ingeniería, S.C. (2009); c) evaluación morfométrica del relieve, a escala 1:50 000; d) análisis del espectro de niveles geomorfológicos para establecer las categorías y subcategorías del relieve; e) interpretación de los patrones orográficos regionales (orientaciones, diseños, correlaciones vecinas); f) comparación de los datos geomorfológicos con la estructura geológica, y g) investigaciones de campo por transectos longitudinales y transversales a la expresión estructural y geomorfológica del relieve.

Para la delimitación del diseño morfotectónico, se detalló y jerarquizó la red hidrográfica; se interpretaron las evidencias geomorfológicas de elementos lineales en el relieve, complementando la información geólogo-sismológica de otros autores, según el método de Orlova (1975); y se delimitaron los bloques morfotectónicos bajo tres principios: consideración de las estructuras de mayor extensión e identificación de superficies máximas de planación con respecto a unidades vecinas. Este análisis delimitó 45 unidades morfotectónicas con desarrollo hipsométrico entre los 50 y los 1 220 m. Además, una vez delimitadas las unidades morfotectónicas, se elaboraron rosas direccionales de morfolineamientos para identificar los patrones disyuntivos preferenciales. Para ello, se calcularon el azimut y la longitud de las estructuras.

3. Resultados

3.1. Diferenciación geomorfométrica

Mediante el mapa hipsométrico, se identificaron y delimitaron las principales categorías del relieve, mismas que se agruparon en los escalones hipsométricos siguientes: V. Montañas medias (> 1300 m), IV. Montañas bajas (800 a < 1300 m), III. Premontañas (400 a < 800 m), II. Lomeríos (200 a < 400 m) y I. Llanuras (< 200 m); esta última se subdividió en I.1 Llanura costera (< 40 m), I.2 Terrazas aluviales (40 a < 200 m) y I.3 Valles aluviales (0 a < 100 m), así mismo, se derivó la subcategoría I.4 Valles aluviales intermontanos (100 a < 500 m), la cual tiene la particularidad de ubicarse en otro nivel hipsométrico, aunque desde el punto de vista morfológico pertenece a la categoría de llanuras.

El perfil topográfico (Figura 3) permite observar la distribución espacial de las categorías del relieve a lo largo de una sección dispuesta en sentido NE-SW, así como las diferencias morfológicas que caracterizan a cada una de éstas. En este sentido, se observa que dichas características están relacionadas directamente con el nivel altitudinal y se puede inferir que las rupturas de pendiente que marcan el límite entre categorías podrían estar asociadas a la presencia de estructuras como fallas y cambios en las características litológicas, lo cual se analiza más adelante.

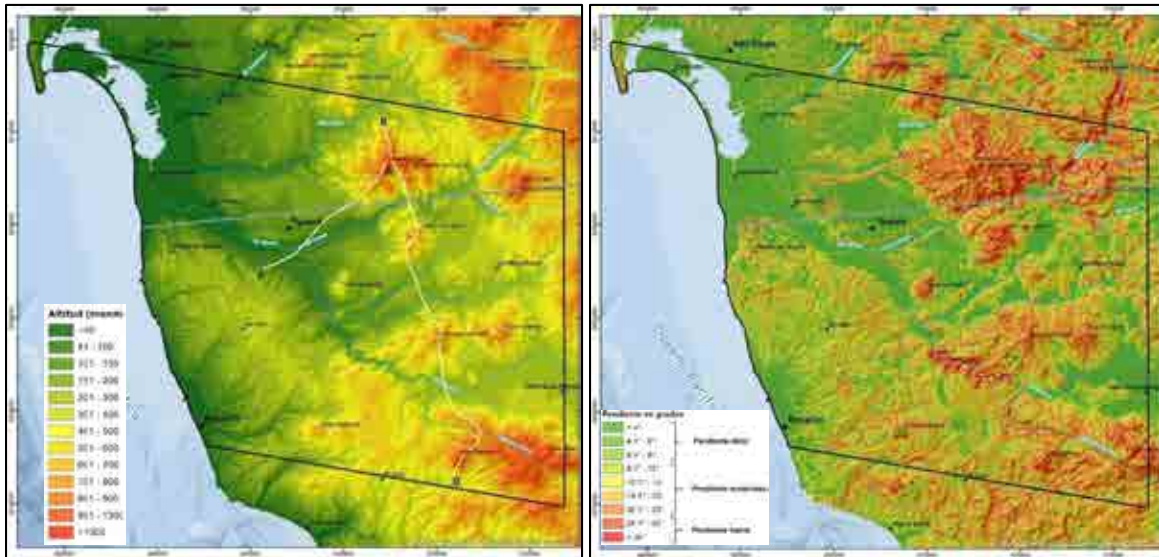


Figura 2. Hipsometría (izquierda) e inclinación del terreno (derecha).

Fuente: elaboración propia.

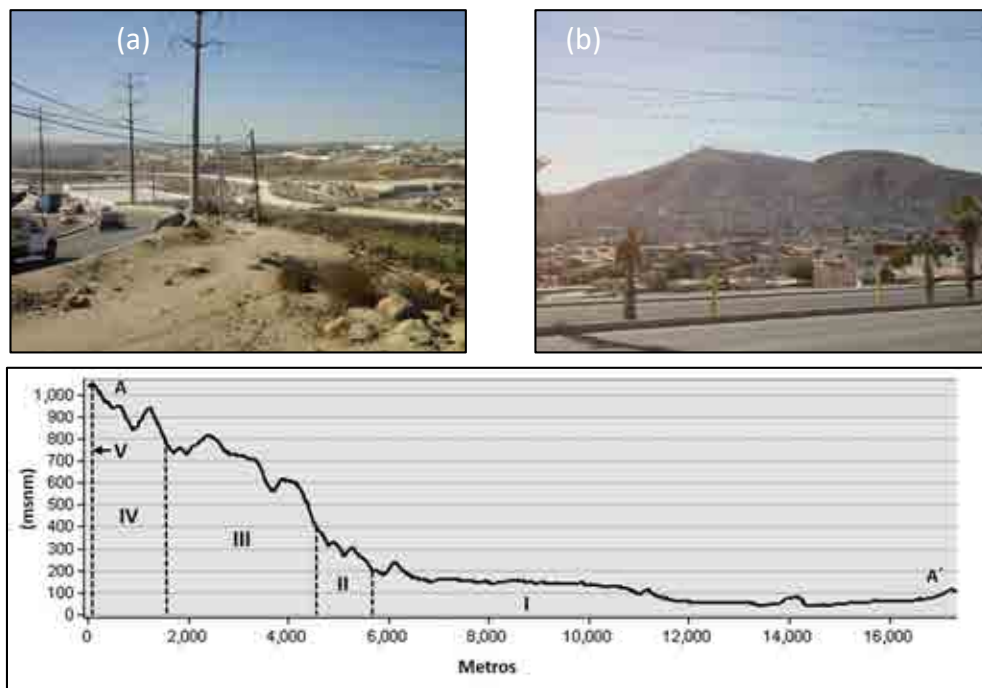


Figura 3. Perfil topográfico en dirección NE-SW, donde se muestra la delimitación de las categorías del relieve: I. Llanuras; II. Lomeríos; III. Premontañas; IV. Montañas bajas y V. Montañas medias.

Las fotografías ilustran las categorías I (a) y II (b), y corresponden al margen izquierdo del arroyo Alamar y al flanco este del Cerro Colorado, respectivamente.

Fuente: cartografía de elaboración propia y trabajo de campo.

En cuanto a la inclinación del terreno, se definieron tres grupos, el primero, denominado débiles, agrupa las pendientes con inclinación menor a 4° , de 4.1° - 6° y 6.1° - 8° ; morfológicamente el primer intervalo se caracteriza por terrenos bajos subhorizontales poco inclinados y con pendiente constante y continua, que corresponden a las llanuras costeras donde se asientan Puerto Nuevo, Rosarito, Playas de Tijuana, Imperial Beach y Coronado; valles aluviales del arroyo Alamar y el río Tijuana, así como terrenos altos con las mismas características como la llanura plana alta de la zona de Otay y los valles intermontanos correspondientes a la sección de mayor altitud de las principales corrientes fluviales; en estos últimos destaca el asentamiento de la localidad Valle de Las Palmas, ubicada al sureste de la zona. El segundo y tercer intervalo se presenta en las cimas alargadas de los lomeríos de origen sedimentario, que se ubican al centro y oeste, así como en aquellos que circundan las bases de las premontañas de origen ígneo del sector oriental.

Las pendientes moderadas, con inclinación de 8.1° - 25° conforman el segundo grupo; su distribución y arreglo espacial corresponde a la trayectoria de corrientes fluviales de primero, segundo y tercer orden que diseccionan los substratos de areniscas y conglomerados, que conforman a los lomeríos que se ubican al centro y oeste de la zona, así como a los substratos de origen ígneo del sector occidental. En este grupo destacan también los cañones con inclinación de 10.1° - 25° dispuestos de forma transversal al borde de la llanura plana alta, mismos que su vez marcan el límite de la llanura aluvial del arroyo Alamar y el río Tijuana, en México, así como el arroyo Otay y el río *Sweetwater*, en territorio estadounidense.

El tercer grupo está definido por las mayores pendientes (mayor a 35°) y se presentan en los interfluvios de los valles intermontanos diseccionados por el Arroyo Seco y el Cañón la Piedra, al sureste, y por el Arroyo Cottonwood, al noreste de la zona; también se presentan en las montañas bajas de origen ígneo, de manera particular en los flancos S y SW de la Montaña Otay y de las Montañas San Isidro, N y NE del Cerro San Isidro, NW del Cerro El Carmelo, SE del Cerro Gordo, y N y S del Cerro Bola. Las laderas de las premontañas Cerro Colorado y Mesa Redonda también alcanzan estas inclinaciones sobre substratos andesíticos y basálticos respectivamente. Por su parte, las pendientes con valores entre

25.1°-35°, se disponen sobre las laderas de las montañas bajas y premontañas mencionadas anteriormente.

Por su parte, la energía del relieve refleja la diferencia altimétrica máxima de la zona; los cálculos quedaron agrupados en siete intervalos: 0-20 m, 20.1-60 m, 60.1-100 m, 200.1-300 m, 300.1-400 m, 400.1-500 m y 500.1-600 m) (Figura 4). Los valores máximos, con valores entre 300 y 500 m, se presentan en las zonas montañosas septentrionales (montañas de Otay, Pico Tecate, Cuchumá y San Isidro); en la porción central (cerros Colorado, El Carmelo y Grande); y en la porción meridional (cerros Mesa Redonda, Gordo y La Bola), este último alcanza valores entre 500 y 600 m.

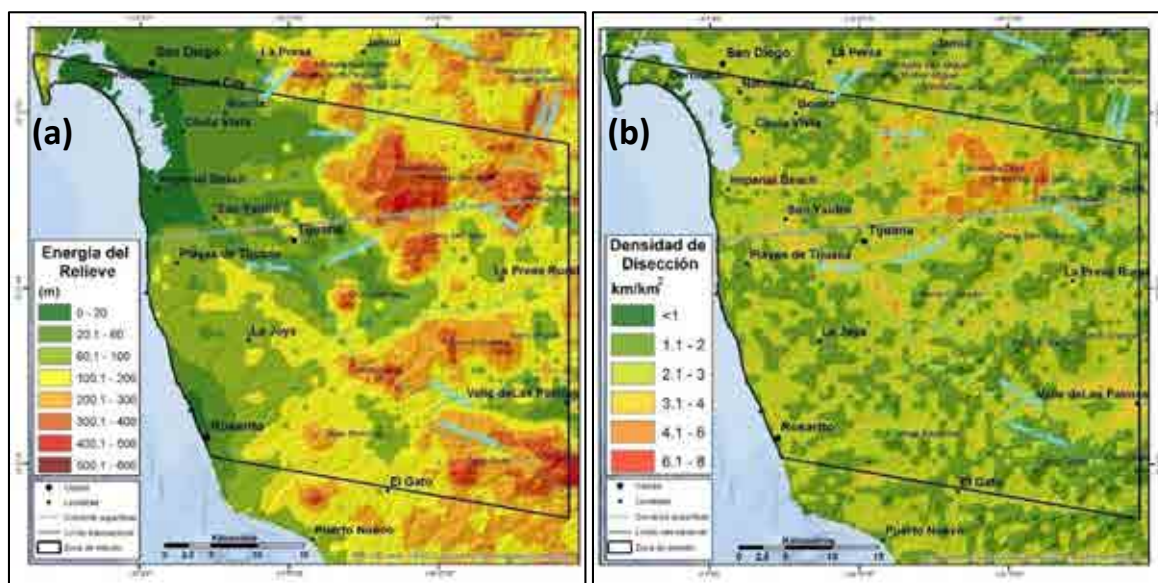


Figura 4. Energía del relieve (a) y densidad de disección (b).

Fuente: elaboración propia.

Con valores entre 200 y 300 m, destacan las zonas premontañas del sector oriental, mientras que los valores entre 100 y 200 m predominan en los lomeríos orientales, así como en sectores de la llanura alta plana, ubicada entre el arroyo Otay y el río Tijuana. En los lomeríos del sector centro-oeste, la profundidad por encajamiento erosivo es del orden de 60 a 100 m. En las llanuras bajas y planos aluviales, los valores oscilan entre 20 y 60 m, mientras que en la llanura costera oscilan entre 0 y 20 m. Otras llanuras interiores, como el valle intramontano del Valle de Las Palmas, presentan valores inferiores a 60 m (Figura 4).

En cuanto a la densidad de disección, los valores altos (4.1-8.0 km/km²), se concentran hacia las elevaciones del noreste, en lo que corresponde a la región de montañas bajas, donde sobresalen la de Otay y la de San Isidro; en dicha zona, el substrato está conformado por rocas ígneas extrusivas de composición ácida, las cuales debido a sus características mineralógicas, no constituyen propiamente un material susceptible de ser diseccionado, sin embargo, la concentración de estructuras disyuntivas como fallas y fracturas contribuye a densificar la red de drenaje.

Los valores medios (2.1-4.0 km/km²) se encuentran enmarcados en una franja que, en términos de altitud, corresponden a las regiones de llanura plana alta, lomeríos y premontañas; se presentan en localidades como Bonita, Chula Vista y San Ysidro para el caso de Estados Unidos, así como El Gato, La Presa Rural y Valle de Las Palmas, en México. En dichos emplazamientos predominan los substratos de areniscas, conglomerados, asociaciones de ambas, así como de limolitas y areniscas, materiales que favorecen la ramificación de las corrientes fluviales; lo anterior se ve reforzado por la presencia de estructuras de debilidad como fallas y fracturas, además de las zonas de contacto litológico, mismas que en conjunto controlan la configuración espacial de la red de drenaje. Así mismo, estos valores se presentan en algunas planicies bajas, como los valles aluviales de los ríos Tijuana, Alamar y Otay, donde se trata de un relieve conformado por substratos terrígenos, principalmente depósitos aluviales recientes.

Los valores de densidad de disección bajos (< 2 km/km²) predominan en las regiones de llanuras bajas, como las llanuras costeras, así mismo, se encuentran dispersos por la zona investigada, principalmente en las cimas de elevaciones como lomeríos, y montañas bajas y medias.

3.2 Diferenciación morfotectónica

En total, se delimitaron 297 morfoalineamientos, a los cuales se sumaron 684 fallas y fracturas delimitadas bajo criterios geológicos para obtener un total de 981 estructuras disyuntivas. Bajo el principio que sostiene que la corteza terrestre está dividida en bloques de diversos tamaños (Lugo, 1988), se delimitaron 45 unidades morfotectónicas cuyas

altitudes varían de 50 a 1,220 msnm, las cuales fueron representadas en un mapa conjuntamente con las formas disyuntivas y los datos epicentrales sobre la sismicidad regional.

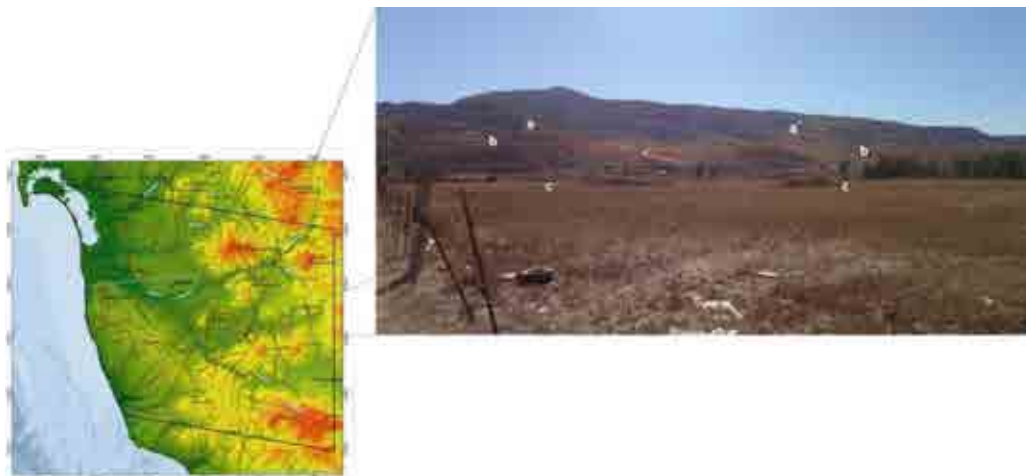


Figura 5. Rasgos morfoestructurales de un morfoalineamiento ubicado al oeste de la ciudad de Tijuana, en la Delegación La Presa: a) Escarpe tectónico; a') Facetas trapezoidales en el escarpe; b) Lomeríos tectónico-erosivos; c) Llanuras erosivas.

Fuente: fotografías adquiridas durante trabajo de campo.



Figura 6. Morfoalineamiento en el Cañón de García, ubicado al sur de la Presa Abelardo L. Rodríguez.

Fuente: fotografías adquiridas durante trabajo de campo.

El análisis de fallas por evidencias geológicas, y por evidencias geomorfológicas y de morfolineamientos revela tres patrones básicos: N-S, NE-SW y NW-SE. El patrón N-S predomina en los bloques del sector oeste y noroeste, a excepción de los bloques Río Tijuana (No. 10) y Rosarito (No. 21), donde predominan las direcciones NW-SE y NE-SW respectivamente (Figura 7). Este patrón refleja la dirección de los principales sistemas de fallas de la región, como La Nación y *Silver Strand*, en California, así como las fallas Los Buenos y Mira al Mar, para el caso de Tijuana. El patrón NE-SW se delinea en los bloques centrales, así como en los del suroeste (bloque Rosarito, No. 21), donde sobresalen las fallas Agua Tibia y García. Este patrón de fallas difiere de las direcciones preferenciales del contexto regional (NW y NS), lo que sugiere que las disyunciones NE-SW podrían conformar un sistema conjugado.

En el sector oriental, las orientaciones del fracturamiento son múltiples y no permiten definir claramente un patrón dominante, aunque predomina la dirección NW-SE, bloques morfotectónicos San Miguel 3 (No. 35) y San Miguel 1 (No. 44), donde las direcciones preferenciales concuerdan con el sistema de fallas San Miguel-Vallecitos, uno de los más activos y cuya orientación guarda correspondencia con los principales sistemas rotacionales entre la falla San Andrés y las fallas marinas de *Coronado Bank*, cuyas velocidades son diferentes. El trazado de perfiles longitudinales en el sector norte, este y sur, son representativos y permitió observar los contrastes altitudinales y morfológicos, que caracterizan a las unidades morfotectónicas que conforman el relieve de la región.

La Tabla 1 muestra las principales características morfométricas y direcciones preferenciales en cada bloque morfotectónico. El análisis muestra que el patrón de fracturamiento más frecuente es NE-SW, presente en 18 unidades morfotectónicas (40 %); el patrón NW-SE ocupa 16 bloques (36 %); el de dirección N-S, se presenta solo en 4 unidades (9 %), mientras que en el 15 % restante no se detectaron fracturas, según el método empleado. Los valores máximos de las variables geomorfométricas, en especial aquellas que están más relacionadas con la actividad neotectónica, como la densidad de disección, energía del relieve y densidad de morfolineamientos, se presentan en las

unidades morfotectónicas, donde las direcciones preferenciales de las formas disyuntivas tienen un patrón NE-SW.

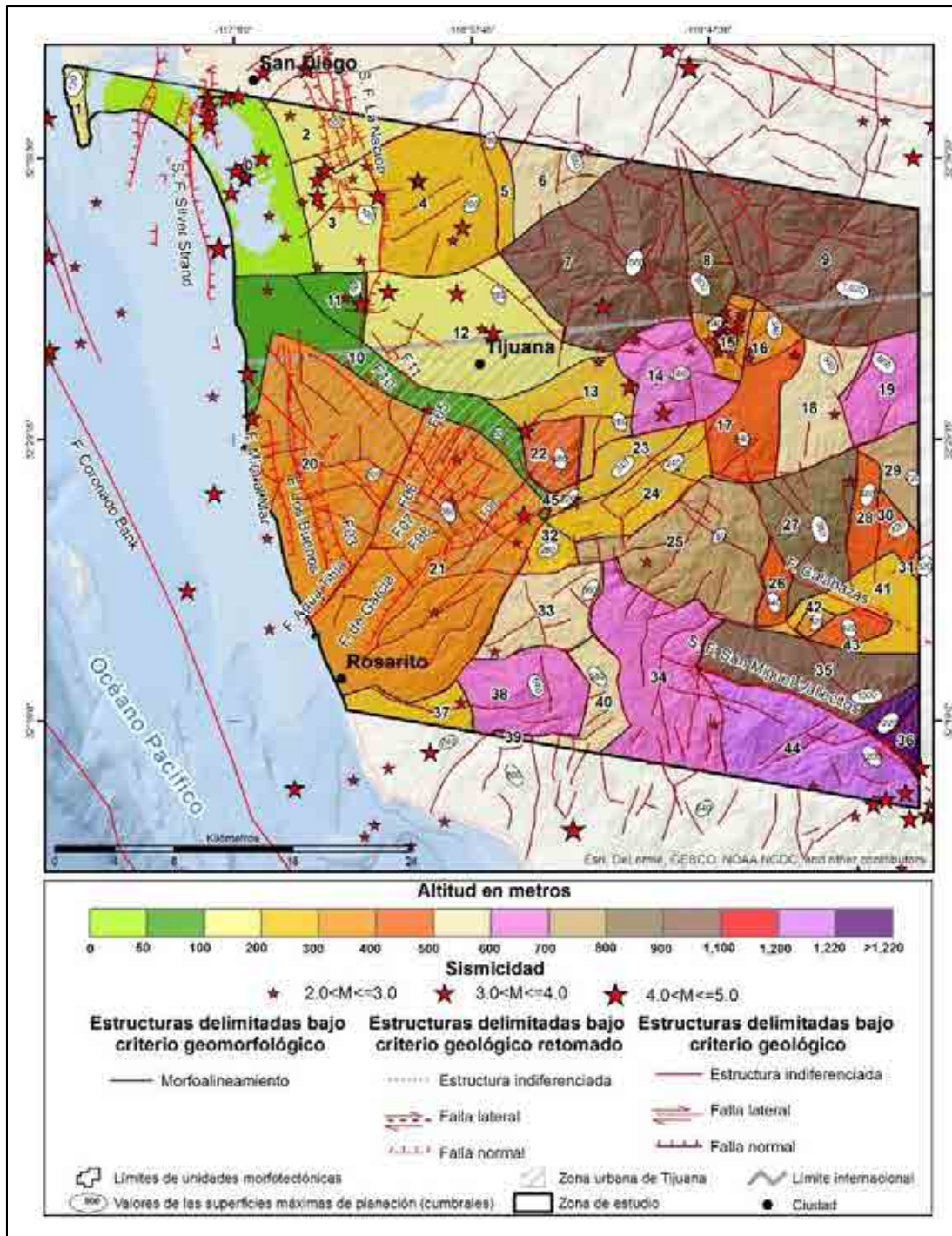


Figura 7. Bloques morfotectónicos, morfolineamientos y sismotectónica regional.

Fuente: elaboración propia.

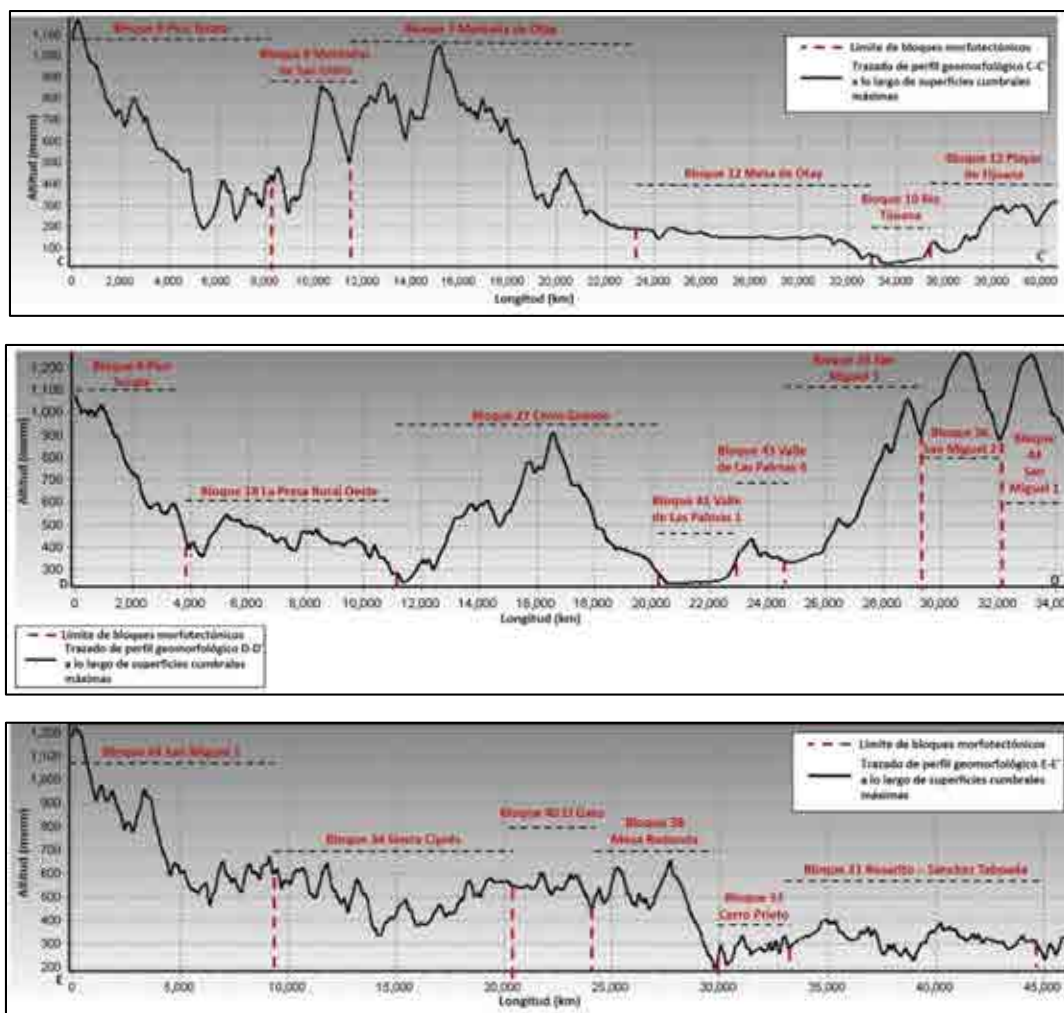


Figura 8. Perfiles longitudinales correspondientes a los sectores norte, este y sur de la zona de estudio; el trazado se realizó a lo largo de las superficies máximas de planación (cumbrales).

Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Principales características geomorfométricas, y direcciones de fallas y lineamientos en los bloques morfotectónicos.

No	Nombre del bloque	Hp			Pe			D.D.			E.R.			D.M.			D.P.
		Mi	Ma	Me	Mi	Ma	Me	Mi	Ma	Me	Mi	Ma	Me	Min	Max	Me	
0	<i>San Diego Bay</i>	0	33	4	0	32	0.9	0	4	1.2	0	89	5	0	4	0.3	S/D
1	<i>Point Loma</i>	0	131	70	0	64	13	0	2	0.4	69	120	94	0	0	0	NW-SE
2	<i>National City</i>	0	138	46	0	42	5	0.5	4	2	13	79	34	0	3	1	NW-SE
3	Chula Vista Oeste	0	124	48	0	44	4	0.7	5	2	16	79	33	0	2	0.6	NW-SE
4	Chula Vista Este	19	300	133	0	51	7	0.7	5	2	20	166	54	0	2	0.4	NW-SE
5	<i>Montaña Mother Miguel</i>	72	294	175	0	33	8	1	6	3	20	113	52	0	1	0.6	S/D
6	<i>Montañas Jamul</i>	143	595	247	0	51	13	0.3	8	3	21	312	146	0	2	0.4	NE-SW
7	Montaña Otay	71	1087	448	0	61	21	0.4	4	2	57	479	262	0	2	0.5	NE-SW
8	Montañas San Isidro	155	969	494	0	53	18	0.6	3	2	86	459	280	0	3	1	NW-SE
9	Pico Tecate	173	1184	516	0	68	18	0.3	5	2	29	490	232	0	3	0.7	NE-SW
10	Río Tijuana	0	169	28	0	45	2	0.3	5	3	0	146	30	0	2	0.4	NW-SE
11	<i>Imperial Beach</i>	4	93	42	0	39	4	1	5	3	12	96	35	0	2	0.3	N-S
12	Mesa de Otay	15	217	128	0	40	5	0.4	5	2	0	175	68	0	2	0.2	NE-SW
13	La Presa Norte	42	286	157	0	38	6	0.5	4	2	21	214	70	0	2	0.4	NE-SW
14	Cerro San Isidro	78	839	356	0	53	18	0.4	4	2	54	447	249	0	2	0.7	NW-SE
15	Cerro El Pilón	137	472	228	0	50	12	0.5	5	3	48	293	162	0	2	0.7	NW-SE
16	El Remolino	173	387	255	0	43	9	0.5	3	2	48	234	119	0	2	0.7	NE-SW
17	Cerro El Macho	169	559	284	0	40	9	0.9	4	2	21	258	136	0	3	0.8	NW-SE
18	La Presa Rural Oeste	205	640	371	0	44	11	0.3	4	2	42	348	128	0	2	0.6	NE-SW
19	La Presa Rural Este	268	743	500	0	37	12	0.7	4	2	47	259	142	0	2	0.3	NE-SW
20	Playas de Tijuana	0	356	160	0	55	9	0.2	4	2	0.4	196	79	0	4	1	N-S
21	Rosarito-Sánchez Taboada	0	413	199	0	44	10	0.1	4	2	0.2	178	84	0	5	1	NE-SW
22	Cerro Colorado	55	551	190	0	46	12	0.6	5	2	30	392	173	0	2	0.8	N-S
23	Cerro Las Abejas 1	105	343	174	0	40	6	0.4	4	2	22	196	74	0	2	1	NE-SW
24	La Presa Sur	93	289	169	0	43	8	0.3	4	3	40	259	98	0	6	1	NE-SW
25	Cerro El Carmelo	98	886	413	0	57	18	0.2	5	2	81	429	233	0	7	2	NE-SW
26	Valle de Las Palmas 2	217	473	313	0	35	10	0.9	4	2	48	222	143	0	3	0.8	NW-SE
27	Cerro Grande	196	908	436	0	40	15	0.2	4	2	62	354	206	0	5	2	NW-SE
28	Loma El Pilón	248	458	346	0	33	7	1	4	2	40	175	102	0	3	0.7	N-S
29	Cerro El Dieciséis	267	761	473	0	38	11	0.8	4	2	48	255	165	0	2	0.1	S/D
30	<i>Wilberth</i>	257	483	354	0	31	7	0.7	4	2	45	218	112	0	1	0.3	S/D
31	Ramos	277	384	302	0	28	7	1	3	2	53	136	94	0	0.2	0.1	S/D

32	Cerro Redondo	99	496	222	0	49	13	1	3	2	68	378	178	0	3	1	NE-SW
33	Cerro Prieto	98	589	354	0	65	13	0.2	4	2	61	370	140	0	4	1	NE-SW
34	Sierra Ciprés	132	692	457	0	51	15	0.4	4	2	32	378	154	0	6	1	NE-SW
35	San Miguel 3	205	1132	552	0	43	17	0.5	5	2	76	431	237	0	4	1	NW-SE
36	San Miguel 2	372	1263	900	0	42	23	0.5	3	2	191	500	351	0	3	1	NE-SW
37	Bahía El Descanso	0	328	157	0	40	11	0.3	3	3	35	156	92	0	1	0.2	NW-SE
38	Mesa Redonda	102	697	366	0	45	16	0.3	5	2	89	376	175	0	2	0.6	NE-SW
39	Cerro El Coronel	111	294	173	0	45	12	2	3	3	126	181	164	0	1	0.9	NW-SE
40	El Gato	189	662	483	0	41	13	0.4	5	2	22	203	122	0	2	1	NE-SW
41	Valle de Las Palmas 1	217	347	266	0	27	2	2	5	3	0.3	270	97	0	1	0.3	NW-SE
42	Valle de Las Palmas 3	233	353	278	0	36	7	0.8	3	2	42	107	76	0	1	0.2	S/D
43	Valle de Las Palmas 4	258	440	333	0	30	9	1	4	2	41	156	84	0	1	0.1	S/D
44	San Miguel 1	303	1283	740	0	47	19	0.3	4	2	108	469	261	0	5	1	NW-SE
45	Cerro Las Abejas 2	86	274	162	0	46	13	1	3	2	103	177	132	1	2	1	S/D

Donde:

H_p: Hipsometría (msnm); **P_e**: Pendiente (grados); **D.D.**: Densidad de Disección (km/km²); **E.R.**: Energía del Relieve (m); **D.M.**: Densidad de lineamientos (km/km²); **D.P.**: Dirección Preferencial de las Formas Disyuntivas; **Mi**: Valor Mínimo; **Ma**: Valor Máximo; **Me**: Valor de la Media; N-S: Dirección Norte-Sur; NW-SE: Dirección Noroeste-Sureste; NE-SW: Dirección Noreste-Suroeste; S/D: Sin datos de las formas disyuntivas.

Fuente: elaboración propia.

3.3. Sismotectónica regional

De acuerdo con los registros del *Southern California Earthquake Data Center* y de la Red Sísmica del Noroeste de México del Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CISESE), la sismicidad regional analizada varía desde $M=2.0$ hasta $M=5.0$. Los sismos con $M=3.0$ son los más frecuentes y se encuentran distribuidos de manera dispersa. Para el análisis y la representación cartográfica, la lista de epicentros fue clasificada en tres intervalos: $2.0 < M \leq 3.0$; $3.1 < M \leq 4.0$ y $4.1 < M \leq 5.0$. Como se puede observar en la Figura 7, los epicentros entre $2.0 < M \leq 3.0$, se distribuyen aisladamente y se ubican en las acuatorias y en los bloques morfotectónicos del extremo noroccidental. Hasta 2016, se cuenta con un registro de 78 eventos con estas magnitudes. La única concentración de estos sismos se presenta al noroeste del bloque morfotectónico Cerro El Pilón (No. 15), con 37 registros de $M=2.0$, con magnitud máxima de $M=2.5$ y promedio de $M=2.1$.

Los sismos de magnitud $3.1 < M \leq 4.0$ reflejan la actividad reciente de los sistemas de fallas, fundamentalmente en la región noroccidental. En el bloque Chula Vista Oeste (No. 3), limitado por el sistema de fallas La Nación, se tiene registro de sismos entre los años de 1954 y 1973; mientras en el sistema *Silver Strand*, se han registrado siete eventos entre los años 1964 a 2007.

En la ciudad de Tijuana, se cuenta con 12 registros en los bloques Cerro San Isidro (No. 14), La Presa Norte (No. 13), Cerro Colorado (No. 22), Cerro Las Abejas (No. 45), Río Tijuana (No. 10), Montaña Otay (No. 7), Mesa de Otay (No. 12), Imperial Beach (No. 11) y Rosarito-Sánchez Taboada (21); en este último, sobre la falla de García; todos con magnitud entre 3.1 y 4.0, durante el período de 1988 a 2005. Al sureste, también se registran epicentros de eventos similares en el sistema San Miguel-Vallecitos (Figura 5). Los sismos de $4.1 < M \leq 5.0$ son menos frecuentes y hasta el año 2016 no se cuenta con registros dentro de la región, aunque en la periferia ocurrieron tres eventos $M=4.2$, ocurridos entre 1978 y 2005. El más peligroso para Tijuana ocurrió en las proximidades del sistema *Silver Strand*.

4. Discusión

Con respecto de las variables morfométricas, para el caso de la hipsometría, el valor máximo se presenta en el Bloque San Miguel 1, donde se alcanza una altitud de 1,283 msnm, mientras que la media más alta se presenta en el Bloque San Miguel 2, con 900 msnm. Por su parte, el valor máximo de pendiente se encuentra en el Bloque Pico Tecate, donde el terreno alcanza inclinaciones de hasta 69°, mientras que el valor promedio más alto corresponde al Bloque San Miguel 2 con 23°.

La densidad de disección más alta se presenta en el Bloque Montañas *Jamul*, donde se alcanzan valores de 8 km/km², mientras que el valor promedio más alto es de 3 km/km² y se encuentra en diversos bloques (No. 5, 6, 10, 11, 15, 24, 37, 39 y 41). La energía del relieve alcanza un valor máximo de 500 m en el Bloque San Miguel 2, el cual también presenta la media más alta con 351 m. En lo que respecta a la densidad de morfolineamientos, el valor máximo está en el Bloque Cerro El Carmelo con 7 km/km², así como también la media de mayor valor, que es de 2 km/km², al igual que en el Bloque Cerro Grande.

Este análisis demuestra que los valores máximos de las variables morfométricas, relacionadas con actividad neotectónica, como la densidad de disección, energía del relieve y densidad de morfolineamientos, se presentan en bloques morfotectónicos, donde las direcciones preferenciales de las formas disyuntivas tienen un patrón NE-SW. Considerando que esto difiere del patrón de fracturamiento dominante en la región norte de Baja California, el cual es NW-SE, dicha situación sugiere que el relieve y sus características morfotectónicas son controladas por los sistemas de fallas locales o secundarios, que a su vez son la expresión de los esfuerzos regionales motivados por el movimiento de los grandes bloques de carácter planetario.

5. Conclusiones

La investigación sobre el marco geólogo-tectónico del noroeste de Baja California para comprender la dinámica y las características morfoestructurales imperantes en la región y que tienen expresiones particulares en sus zonas de influencia, como en la ciudad de Tijuana

y su periferia, reveló que su relieve está controlado por los esfuerzos generados en los sistemas locales de fallas.

Un aporte se expresa en la información relativa a las fallas que afectan a la ciudad de Tijuana, caracterizadas en su localización, sus tasas de desplazamiento y su potencial sísmico, por citar algunos parámetros. La aplicación de métodos geomorfológicos para la identificación y representación cartográfica de formas disyuntivas, no reportadas anteriormente en la literatura, logró identificar alrededor de 300 morfolineamientos, como base para los análisis morfotectónico y morfoestructural, con la delimitación de 45 bloques morfotectónicos, en los cuales predominan patrones de fracturamiento NE-SW y NW-SE.

El análisis morfométrico del relieve con la finalidad de conocer sus principales características cuantitativas demostró que el relieve moderno se desarrolla en un rango altitudinal de 0 a 1,300 msnm; con pendientes que superan los 35° de inclinación en las zonas montañosas; con valores de energía del relieve que alcanzan el orden de 600 m y de la densidad de disección, con valores entre 0 y 8.8 km/km², mientras la densidad de morfolineamientos presenta hasta 7.5 km/km². Dichas variables también representan una fuente de información útil para los análisis de las actividades neo y sismotectónica.

La identificación de sismos en los límites de los bloques morfotectónicos y cercanos a formas disyuntivas, refuerzan la hipótesis sobre la movilidad de diversas zonas de la ciudad de Tijuana, como quedó demostrado en la Zona Río, que desde el punto de vista morfoestructural corresponde a una llanura de tipo graben, situada en la articulación entre bloques, indicando que su génesis está asociada a la dinámica de los sistemas locales de fallas y morfolineamientos, lo que determina una condición de peligro sísmico para este sector urbano y de deformaciones del terreno que impactan a la infraestructura civil y productiva.

Otros trabajos muestran que los niveles de riesgo sísmico en la ciudad de Tijuana pueden ser altos, debido al contexto sismotectónico de su localización geográfica, pero la cartografía y el análisis morfotectónico representan una aportación novedosa y útil desde una perspectiva espacial, que puede coadyuvar al análisis del peligro sísmico. A su vez,

muestra una diferenciación de la expresión de la geodinámica territorial con la integración de distintas variables, que contribuyen a las tareas de planeación urbana y territorial.

Desde un ángulo aplicado, el mapa morfotectónico podría orientar estudios más detallados de la amenaza sísmica en los sitios con los mayores niveles de actividad geodinámica. En este sentido, orienta el análisis espacial de corte geofísico y geotécnico para caracterizar la respuesta sísmica del terreno, o emprender estudios de corte geólogo-estructural para caracterizar las formas disyuntivas identificadas y que representan una variable de peso en la conformación de los escenarios de peligro y de riesgo sísmico. Así mismo, las investigaciones geodésicas representan otra posibilidad de uso de la cartografía morfotectónica presentada, ya que permite emplazar estaciones para el monitoreo *in situ*, tanto de la deformación del terreno como el monitoreo de actividad microsísmica, posible de obtener con acelerómetros de alta sensibilidad.

Agradecimientos.

Se agradece a Carlos Isidro Huerta López, quien, estando adscrito al Instituto Tecnológico de Tijuana durante el desarrollo de la investigación, brindó su apoyo y orientación para realizar trabajo de campo en la ciudad de Tijuana y su área circundante. Asimismo, se agradece al Posgrado en Geografía de la UNAM, el apoyo presupuestario para los levantamientos de campo.

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

6. Referencias

- Acosta, J., Arellano, G. y Ruíz, E. (2009). *Microzonación sísmica en la zona urbana de Tijuana, B.C.* (Informe Final). Mexicali: Dirección Estatal de Protección Civil de Baja California.
- Berger, V. y Schug, L. (1991). Probabilistic evaluation of seismic hazard in the San Diego-Tijuana Metropolitan region. En P.L. Abbot y J.W. Elliot (eds.) *Enviromentalperils, San Diego Region*. California: San Diego Association of Geologist, pp. 89-100.

Cruz, M. (2002). Catálogo de las fallas regionales activas en el norte de Baja California, México. *GEOS Unión Geofísica Mexicana*, A. C. Recuperado el 15 de abril de 2015 de: <http://www.ugm.org.mx/publicaciones/geos/pdf/geos02-1/Cruz-Castillo02-1.pdf>.

Data México (2020). Acerca de Tijuana. Secretaría de Economía, Gobierno de México. <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/tijuana-99203>

Delgado-Argote, L. A., Pérez-Flores, M. A., Herrera-Barrientos, F., Sarychikhina, O., Contreras-López, M., Ochoa-Tinajero, L., Avilés-Esquivel, T. A. (2017). Interpretación geológica y geoeléctrica de un deslizamiento rotacional relacionado con paleodrenaje en el fraccionamiento Valle del Sur, en Tijuana, Baja California. *GEOS*, 37(2):1-17.

Garatachia, J. C, Baró, J. E. y Huerta, C. (2016). Aproximación a la vulnerabilidad estructural y socioeconómica en el marco de un estudio de riesgo sísmico en la zona urbana de Tijuana, Baja California. En M. V. Santana Juárez, G., Hoyos Castillo, F. Zepeda Mondragón, J. R. Calderón Maya, G. Santana Castañeda (coords.) *Vulnerabilidad Territorial ante la Expansión Urbana*. Toluca: Red Internacional de Territorios, Sustentabilidad y Gobernanza en México y Polonia (RETESYG), pp. 125-144.

Gastil, R., Phillips, R. y Allison, E. (1975). Reconnaissance geology of the state of Baja California. *The Geological Society of America*, Memoir 140, 170 p.

Hernández-Santana, J. R., Pérez, J., Rosete, F., Villalobos, M., Méndez, A. P. y Navarro, S. (2017). Clasificación geomorfométrica del relieve mexicano: una aproximación morfográfica por densidad de curvas de nivel y energía del relieve. *Investigaciones Geográficas, Instituto de Geografía*, 94, 1-15.

Ibarra, G. (2004). Microzonación de períodos dominantes en los principales centros urbanos de Baja California (Tesis de Maestría). Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Ensenada, México.

Ibarra, G., Oliver, O., F. y Acosta, C., J., 2009. Microzonación de períodos dominantes del suelo de la ciudad de Tijuana, Baja California. *Epistemos. Ciencia, Tecnología y Salud*. Recuperado el 15 de abril de 2015 de: <http://www.epistemos.uson.mx/revistas/pdf/numero7.pdf>.

INEGI (1976). Cartas geológicas, a escala 1:50 000, hojas I11C69 (Tijuana), I11D61 (Valle Redondo), I11D62 (Tecate), I11C79 (Rosarito), I11D71 (San Luis), e I11D72 (Valle de Las Palmas). México, D. F.

INEGI (2020). Censo de Población y Vivienda, CDMX.

Kennedy, M., P. y Tan, S., S. 2008. Geologic map of the San Diego 30' x 60' quadrangle, California. California Geological Survey, United States Geological Survey, California, 21 pp.

Lindvall, S.C., Rockwell, T. y Lindvall, C. E. (1989). *The seismic hazard of San Diego revised: New evidence for magnitude 6+ Holocene earthquakes on the Rose Canyon fault zone*. Workshop on The Seismic Risk in the San Diego Region: Special Focus on the Rose Canyon Fault System San Diego. University of California. Recuperado el 10 de abril de 2015 de: <https://books.google.com.mx/books>.

Lugo-Hubp, J. I. (1988). *Elementos de geomorfología aplicada: Métodos cartográficos*. México, D. F., Ed. Universidad Nacional Autónoma de México, 128 pp.

Lugo, H., J. 2015. Diccionario Geomorfológico. 2a ed. Serie Textos Universitarios. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Michaud, F., Calmus, T., Sosson, M., Roger, J., Burgois, J., Chabert, A., Bigot-Cornier, F., Bandy, B., Montera-Gutierrez, C. y Dymont, J. (2005). La zona de falla Tosco-Abreojo: un sistema lateral derecho activo entre la placa Pacífico y la península de Baja California. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Volumen Conmemorativo de Centenario Grandes Fronteras Tectónicas de México. LVII(1), 53-63.

Moro Ingenieria, S.C. (2009). Actualización del estudio hidrogeológico del Acuífero Tijuana, B.C. Comisión Nacional del Agua, México, D. F.

Orlova, A., V. (1975). *La estructura en bloques y el relieve*. Ed. Niedra, Moscú, 232 pp. (en ruso).

Raines, L., Hatch, M., y Haley, C. (1991). Liquefaction potential in the San Diego-Tijuana metropolitan region. En P.L. Abbot y J. W. Elliot (eds.) *Enviromental perils, San Diego Region*. California: San Diego Association of Geologist, pp. 127-136.

- Reichle, M. (1991). Earthquake planning scenario for the San Diego-Tijuana area. En P.L. Abbot y J.W. Elliot (eds.) *Enviromentalperils, San Diego Region*. California:San Diego Association of Geologist, pp. 127-136.
- Rosquillas, N., A. y Mendoza, G., L. (2002). Proyecto RADIUS caso Tijuana (Reporte Final). Tijuana, H. Ayuntamiento Constitucional de Tijuana y Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada. 2ª ed.
- Servicio Geológico Mexicano (2003). Carta Geológico-Minera Tijuana I11-11, Baja California, a escala 1:250 000. Secretaría de Economía, México, D. F.
- Strahler, A., N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*: Volume 38, Issue 6, pp. 903-920. <https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>
- Spiridonov, A. I. (1974). *Cartografía geomorfológica*. Moscú: Niedra. 182 pp. (en ruso).
- Spiridonov, A. I. (1982). *Metodología general de las investigaciones geomorfológicas y la cartografía geomorfológica*. La Habana: Ed. Universidad de La Habana.
- Todd, V. (comp.) (2004). Preliminary Geologic Map of the El Cajon 30' x 60' Quadrangle, Southern California. Version 1.0. California: United States Geological Survey.
- United States Geological Survey (2006). Quaternary fault and fold database for the United States. Recuperado el 14 de octubre de 2016 de: <http://earthquake.usgs.gov/hazards/qfaults/>.
- Winckell, A., Le Page, M., Chávez, G., Vela, R., Castañeda, R. y González, C. (2000). ¿Y si un terremoto de magnitud 6?5 se produjera en la falla La Nación? Aportes para un escenario sísmico en Tijuana. Tijuana: El Colegio de la Frontera Norte e Institut de RecherchePour Le Développement.

Propuesta de un plan de ordenamiento territorial integral costero. Estudio de caso: Cazones de Herrera, Veracruz

Proposal for an Integrated Coastal Territorial Ordering Plan. Case Study: Cazones de Herrera, Veracruz

Daniel Morales Méndez ^{1*}, Ana María Gómez Viera ²

¹ Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad Veracruzana, Carretera Tuxpan Tampico Kilómetro 7.5 Universitaria 92870 Tuxpam de Rodríguez Cano, Veracruz, México, danielmmgeos@gmail.com , <https://orcid.org/0000-0003-3614-3284>

² Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad Veracruzana, Carretera Tuxpan Tampico Kilómetro 7.5 Universitaria 92870 Tuxpam de Rodríguez Cano, Veracruz. México, gomezvana@gmail.com , <https://orcid.org/0000-0002-8288-7447>

*Autor de correspondencia

Recibido: 02/12/2024. Aceptado: 06/01/2025. Publicado: 21/01/2025.

Cómo citar: Morales Méndez, D., & Gómez Viera, A. (2025). Propuesta de un plan de ordenamiento territorial integral costero. Estudio de caso: Cazones de Herrera, Veracruz. Geografía Aplicada, 1(1), 107-138. Consultado de <https://geografiaaplicada.uaemex.mx/article/view/25622>

Resumen

Este estudio presenta una propuesta de plan de ordenamiento territorial integral costero para el municipio de Cazones de Herrera, Veracruz, con el uso de la metodología de Planeación y Gestión Integral de la Zona Costera (Barragán, 2003). El análisis integró tanto la zona terrestre, como la zona litoral y marina del caso de estudio. Posteriormente, se realizó un diagnóstico integral del territorio, con la caracterización de variables de los subsistemas físico, natural, social y económico mediante información espacial y estadística. Se aplicó un modelo presión-estado-respuesta para evaluar las condiciones de estrés, estabilidad y contención del territorio, complementado con un análisis FODA. La propuesta del plan de ordenamiento se estructuró a partir de estrategias de restricción, protección, recuperación, desarrollo de infraestructura, diversificación de usos del suelo, promoción del ecoturismo, crecimiento controlado, gestión de bienes demaniales y fomento de prácticas agrícolas y ganaderas sostenibles. Finalmente, los resultados se difundieron a través de un geoportal de acceso libre, el cual facilita a los usuarios interesados la consulta y el análisis de los componentes espaciales del plan de ordenamiento territorial integral costero.

Palabras clave: Litoral Veracruzano, Ordenamiento territorial, Planeación y gestión integral de la zona costera, Sistemas de Información Geográfica, Zona Costera.

Abstract

This study presents a proposal for an Integrated Coastal Territorial Ordering Plan for the municipality of *Cazones de Herrera*, Veracruz, applying the Coastal Zone Integrated Planning and Management methodology (Barragán, 2003). The analysis integrated the land area, as well as the coastal and marine zones of the study area. Subsequently, a comprehensive territorial diagnosis was conducted, characterizing variables from the physical and social subsystems, using spatial and statistical data. The pressure-state-response model was applied to evaluate the conditions of stress, stability, and containment of the territory,

complemented by a SWOT analysis. The plan was structured based on strategies for restriction, protection, recovery, infrastructure development, land use diversification, ecotourism promotion, controlled growth, management of public assets, and the promotion of sustainable agricultural and livestock practices. Finally, the results were disseminated through an open-access geoportal, enabling interested users to consult and analyze the spatial components of the Integrated Coastal Territorial Ordering Plan.

Keywords: Coastal Zone, Geographic Information Systems (GIS), Integrated Coastal Zone Planning and Management, Territorial Ordering, Veracruz Coastal Zone.

1. Introducción

En el marco de los sistemas ambientales y sus inherentes interacciones dinámicas espacio-temporales, la zona costera representa uno de los medios con mayor variabilidad debido a la cantidad de factores involucrados y lapsos cortos de cambio (Rivera-Guzmán et al., 2014; Criollo y Rojas, 2024). Las problemáticas de las zonas costeras se han convertido en uno de los temas de mayor relevancia científica, política y económica (UNESCO, 2003; CONABIO, 2015, Chávez, 2023), al contemplarse en los programas de cambio climático como un punto clave (IPCC, 2013). Entre las alternativas para solventar problemáticas espaciales costeras, se encuentra el Ordenamiento Territorial (OT), que constituye una herramienta integral cuyo objetivo es lograr una mejor calidad de vida para las sociedades bajo un enfoque de sostenibilidad ambiental, social y económica; con el uso de variables naturales, socio-culturales, económicas, urbano-regionales y políticas; bajo un enfoque dinámico y legislado por el Estado (Ramírez et al., 2016). Este trabajo propone un plan de ordenamiento territorial costero, donde se delimitaron unidades estratégicas territoriales y se propone soluciones a problemáticas identificadas a partir de la metodología de Barragán (2003). A manera de introducción, a continuación, se contextualiza el enfoque propuesto.

1.1. Del Ordenamiento Territorial hasta la Planeación y Gestión Integral de la Zona Costera

El ordenamiento territorial (OT), como política de Estado e instrumento de planificación, surgió en la década de 1930 vinculado al Estado de Bienestar, y se consolidó como disciplina técnico-económica, social, ambiental y administrativa a partir de 1960 (Sanabria, 2014). Su origen responde a crisis socioeconómicas y ambientales, destaca el Plan Integrado del Valle de Tennessee (1933) como precursor occidental de proyectos con enfoque territorial, mientras que en Europa se vinculó a la planificación urbanística (INE, 2000; Sanabria, 2014). En España, el OT refleja su organización descentralizada de comunidades autónomas y se concibe como una función pública orientada al desarrollo económico sectorial, que busca la mejora en la calidad de vida con criterios de sustentabilidad (Sanabria, 2014; de la Cruz-Mera y Chornet, 2019). En América Latina predominan tres enfoques principales: la planificación física con énfasis urbano o municipal, la planificación ambiental orientada al uso sostenible de recursos, protección ambiental y prevención de desastres, y la planificación socioeconómica centrada en el desarrollo económico territorial (Carrión et al., 2020).

Para el caso mexicano, el Ordenamiento Territorial (OT) se ha abordado desde el enfoque ecológico y urbano, a nivel federal, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente señala la facultad de la federación para la elaboración del programa de ordenamiento ecológico del territorio nacional, el ordenamiento ecológico marino y regional, los ordenamientos regionales, faculta a los Estados para elaborar sus propios programas de ordenamiento ecológico y además contiene la figura para la elaboración de los programas de ordenamiento ecológico comunitarios. En materia de ordenamiento territorial la Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano, faculta a los Estados para realizar los instrumentos legales en materia de desarrollo urbano. La Ley Estatal de Protección Ambiental en Veracruz, permite al Estado elaborar programas de ordenamiento ecológico estatal y regionales, actualmente existen cuatro

programas de ordenamiento ecológico regional publicados en instrumentación. En la parte urbana, regulados por la Ley de Desarrollo Urbano, Ordenamiento Territorial y Vivienda, existen en Veracruz 35 programas de desarrollo urbano de centros de población. Estos programas establecen una zonificación, usos del suelo, acciones de conservación, mejoramiento y crecimiento en centros de población (SEDATU et al., 2017).

En cuanto al ordenamiento costero en México, comenzó con un enfoque sectorial y evolucionó bajo las teorías de desarrollo regional. Para 2006, la planeación en océanos y costas no consideraba la aptitud territorial, la capacidad de carga, la regeneración de ecosistemas ni los conflictos socioambientales, lo que causaba incompatibilidades y disputas por el uso del territorio (Rosete et al., 2006; SEMARNAT, 2007; Rosete et al., 2019). Como respuesta, se adoptó el manejo integral de la zona costera, incorporado en la metodología del Ordenamiento Ecológico Marino (OEM). Sin embargo, las diversas atribuciones y competencias generan que una misma actividad sea regulada por múltiples normativas y autoridades, generalmente sin criterios homogéneos de aplicación (SEMARNAT, 2007; Díaz-Mondragón et al., 2021).

En este sentido, la metodología de Planeación y Gestión Integral de Áreas Litorales (PGIAL) propuesta por Barragán (2003) presenta una metodología estructurada a partir de subsistemas, y además puede ser flexible a implementaciones y adiciones según cada caso de estudio. Resalta su aplicación en el caso español que, debido a la autonomía de comunidades sobre la zona costera, permite la aplicación de la metodología de PGIAL (de Andrés et al., 2020). Las diferentes etapas de las metodologías en cuanto a planeación se enuncian en la tabla 1.

Tabla 1. Etapas de las diferentes metodologías.

	Ordenamiento Ecológico Local	Ordenamiento Ecológico Marino	Programa Municipal de Desarrollo Urbano	Planeación y Gestión Integral de la Zona costera
Etapas	Caracterización	Caracterización	Antecedentes	Previa
	Diagnóstico	Diagnóstico	Diagnóstico-pronóstico	Institucional
	Pronóstico	Pronóstico	Normatividad	Análisis y diagnóstico
	Propuesta	Propuesta	Políticas y estrategias	Propositiva
			Programas	

Fuente: Elaboración propia

1.2. Zona costera y caso de estudio

La zona costera o litoral abarca desde el límite marino de la plataforma continental y mar territorial hasta los límites geopolíticos de los municipios con frente litoral o adyacente tierra adentro (Silva et al., 2017). En el ámbito territorial, los municipios costeros pueden delimitar el ordenamiento y planeación del territorio. En el ámbito marino, la Ley Federal del Mar (Diario Oficial de la Federación, 1986) define las siguientes demarcaciones: a) Mar Territorial, b) Aguas Marinas Interiores, c) Zona Contigua, d) Zona Económica Exclusiva, e) Plataforma Continental y Plataformas Insulares, y f) Otros espacios permitidos por el derecho internacional. La Figura 1 sintetiza los ámbitos del litoral aplicables al ordenamiento territorial en municipios costeros mexicanos, basada en Barragán (2003) y la Ley Federal del Mar (D.O.F., 1986).

Se eligió el municipio de Cazones de Herrera, perteneciente al Estado de Veracruz, como modelo del presente trabajo por su localización estratégica litoral, por no contar con un programa de ordenamiento ecológico local, no estar incluido en ningún programa de ordenamiento ecológico regional, no tener un programa de desarrollo municipal y aun cuando está inscrito en el Programa de Ordenamiento Ecológico Marino y Regional del Golfo de México y Mar Caribe, éste incluye una propuesta desfasada de la realidad local del territorio. El municipio se localiza en el norte del estado de Veracruz de Ignacio de la Llave, entre los paralelos 20° 36' y 20° 49' de latitud norte, y entre los meridianos 97° 10' y 97° 25'

longitud oeste (Figura 2); La superficie del municipio es de 270.038 km², mientras que el litoral de Cazones de Herrera consta de 15.44 km.

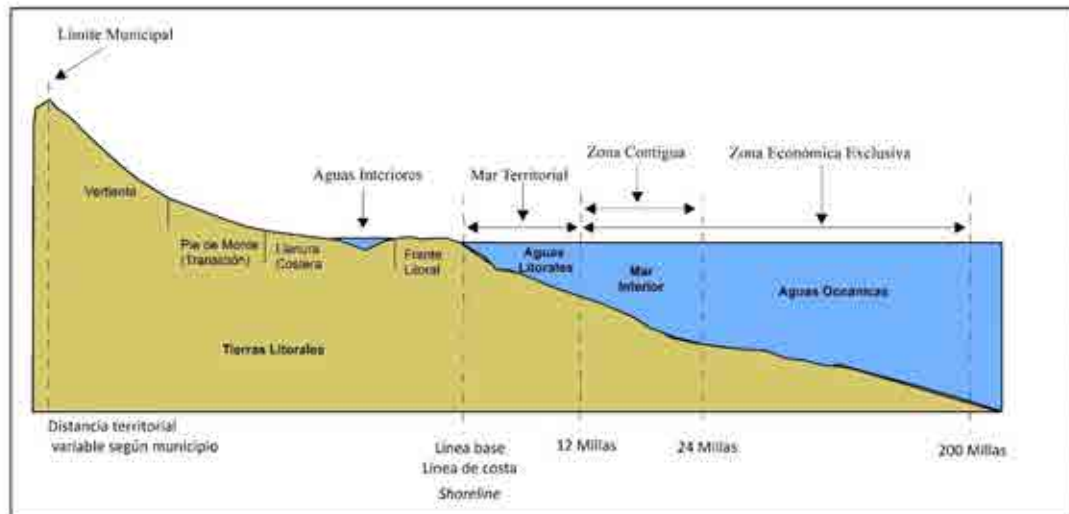


Figura 1. Ámbitos geográficos del litoral para el ordenamiento territorial integral.

Fuente: Elaboración propia a partir de Barragán (2003) y la Ley Federal del Mar (D.O.F., 1986).

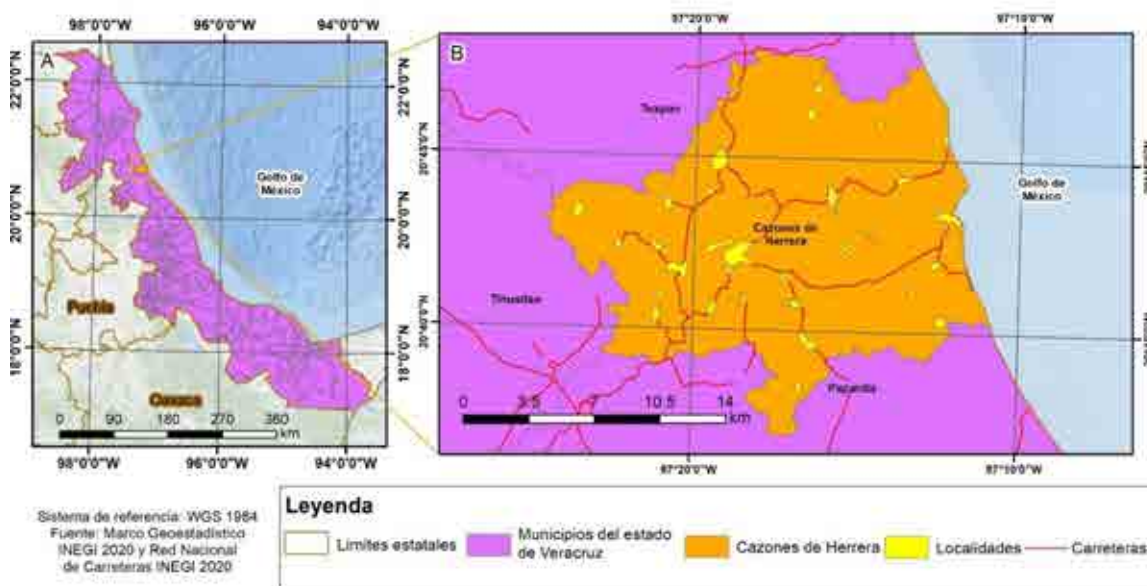


Figura 2. Localización del área de estudio. A: Cazones de Herrera en su contexto estatal. B: Carreteras y localidades del municipio de Cazones de Herrera.

Fuente: Elaboración propia.

2. Metodología

Se aplicó la metodología de Planeación y Gestión Integral de la Zona Costera (PGIAL) (Barragán, 2003) en sus etapas previa, análisis /diagnóstico, y etapa de propuesta, con la elaboración de un geoportal de acceso público para la consulta de la cartografía elaborada en todas las etapas del plan.

Como parte de la etapa previa, se realizó una búsqueda en libros y artículos científicos publicados sobre el área de estudio, fuentes periodísticas, para concluir con una relación de elementos en las páginas web que predominan en una búsqueda convencional. Se elaboró un mapa base de los componentes del litoral para mostrar de manera sencilla los elementos que interactúan en la zona de estudio.

Se desarrolló el apartado analítico con la caracterización de variables, la información espacial y estadística se eligió conforme a los sub-sistemas planteados en la metodología de Barragán (2003), y como guía el anexo 6 del libro “El ordenamiento ecológico del territorio. Logros y retos para el desarrollo sustentable” (INE, 2000).

Para el diagnóstico se agrega un modelo de presión-estado-respuesta elaborado con los componentes que representan condiciones de estrés, de estabilidad y de contención; a su vez se evaluaron los cambios de cobertura de suelo, un diagnóstico FODA para enlistar las problemáticas reconocidas y se definió un escenario tendencial que resume el diagnóstico-análisis de manera interpretativa.

La etapa propositiva plantea las estrategias que conforman el plan de ordenamiento territorial. Se abordan desde propuestas para la resolución de problemáticas hasta la delimitación de unidades estratégicas territoriales conforme a un análisis multivariable.

3. Resultados

3.1. Etapa previa

Cazones de Herrera fue establecido como municipio en 1936, destacándose inicialmente por la producción de plátano a cargo de la empresa Wimber Co., aunque esta industria decayó debido a la contaminación. Actualmente, las principales actividades agrícolas incluyen el cultivo de naranja, chile y maíz (Sala, 2002). Las actividades económicas locales son poco organizadas, con un desarrollo limitado en la pesca y ganadería, lo que ha provocado migración de habitantes (Sala, 2002).

En términos de biodiversidad, se han realizado estudios sobre arrecifes, corales, y una evaluación florística y faunística. Martos (2010) analizó la diversidad del arrecife Blake, mientras que Juárez-Aguilar et al. (2019) estudiaron la precipitación de aragonita en conchas de *Anadara brasiliensis* en Playa Norte. En El Pulpo, de la Cruz-Francisco et al. (2017) registraron 243 especies, destaca la anidación de tortugas *Chelonia mydas* en Playa Chaparrales como atractivo turístico (Rojas-Baños et al., 2022).

El municipio es considerado para la instalación de una planta energética marina (Hernández-Santana et al., 2022). Además, Infante y Cervantes (2022) sugieren que un manejo sostenible de recursos y diversificación económica podría mitigar problemáticas ambientales.

La contaminación del río Cazones, influenciada por actividades industriales en Poza Rica, y la dependencia económica del turismo y pesca, destacan como principales problemas ambientales. El reconocimiento previo de los componentes de la etapa previa se ilustra en el siguiente mapa base (Figura 3).

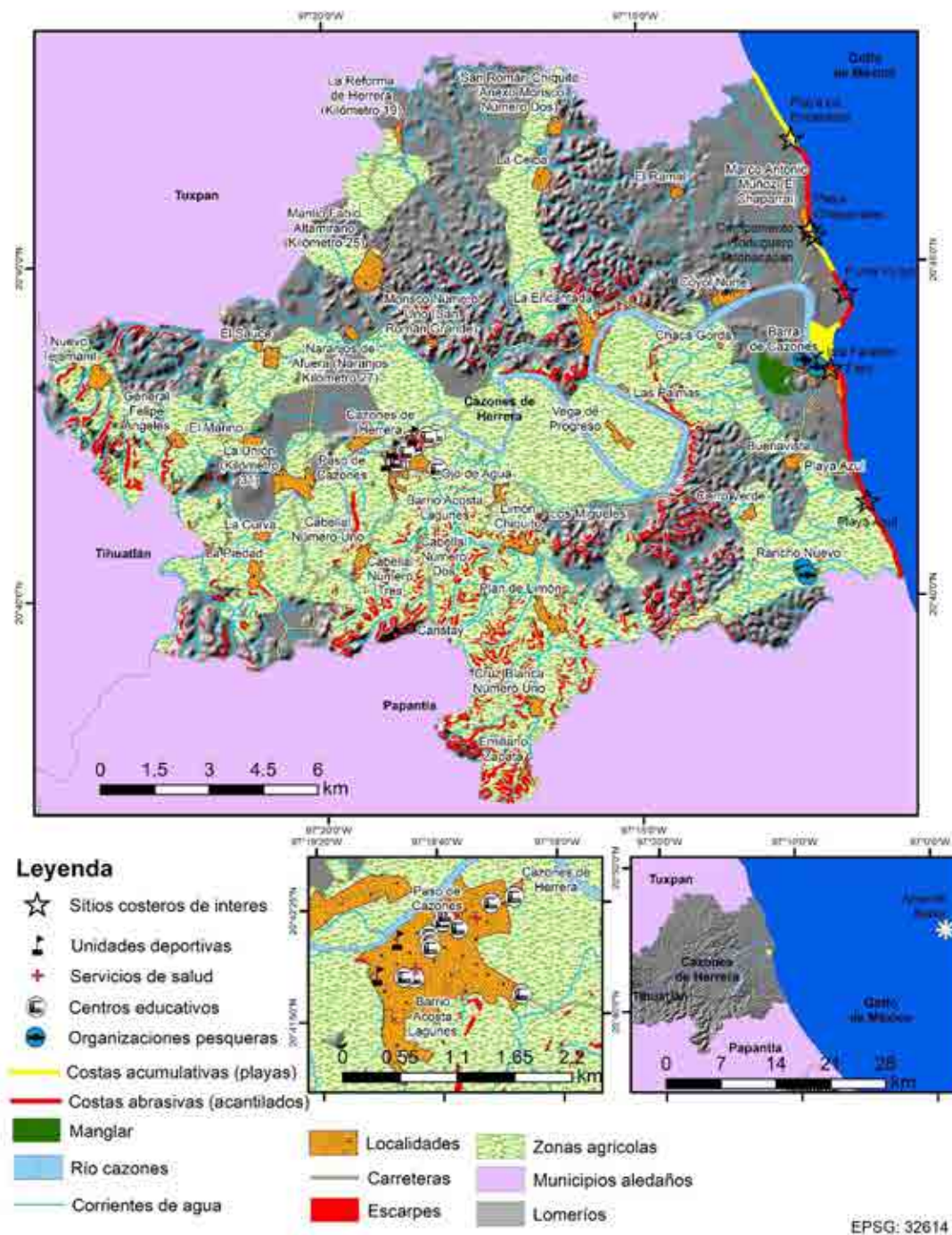


Figura 3. Mapa base con los elementos del municipio costero identificados en la etapa previa.

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Etapa análisis/diagnóstico

La etapa de análisis consistió en la elaboración de cartografía y obtención de indicadores estadísticos para los subsistemas físico-natural, social económico y político-administrativo como lo menciona la metodología de Barragán (2003). Ante el creciente desarrollo en materia GeoWeb en el país (Olmedo-Muñoz y Morales, 2024), se desarrolló como medio de consulta de esta cartografía un geoportal elaborado sobre ArcGis Online, disponible en <https://uveracruzana.maps.arcgis.com/apps/instant/portfolio/index.html?appid=b5dd388bf5ef48e1927557ee001e7a6e>

A continuación, se muestra una síntesis del diagnóstico de los elementos del subsistema físico-natural:

- Geología: predominan el aluvión (23.81% de superficie), arenisca-conglomerado polimíctico (75.80%), arenisca-limolita (0.82%) y depósitos eólicos (0.48%) (SGM, 2004).
- Altimetría: elevaciones de 0 a 190 msnm, con zonas de transición en la costa (12-20 msnm) y máximas en conglomerados calcáreos (INEGI, 2019).
- Inclinação del terreno: pendientes menores a 2° en la zona costera, medias entre 2.1-5.3°, y máximas de 37° en áreas escarpadas.
- Geomorfología: llanura Costera del Golfo Norte, con sedimentación intensa y bloques levantados en el municipio (Mancera, et al., 2020; Hernández-Santana et al., 2022).
- Edafología: los suelos predominantes son Regosoles (77.90% de superficie), Phaeozem (13.84%), Vertisoles (3.93%), Cambisol (2.87%) y Gleysol (0.57%) (INEGI, 2013).

- Hidrografía e hidrología: el municipio se localiza en la región hidrológica Tuxpan-Nautla, en la cuenca del río Cazones. El total de longitud de las corrientes superficiales en el municipio es de 431.986 km (INEGI, 2010).
- Clima: cálido subhúmedo; precipitación media mensual 11.4-186.8 mm y temperatura media anual 19.7-28.3 °C (SMN, 2010).
- Uso del suelo: pastizal cultivado (45.71% de superficie), agricultura de temporal (35.59%) y humedad (11.10%). Selva alta perennifolia (4.80%), manglares (0.28%) y asentamientos (0.23%) (CONAFOR, 2013).
- Recursos forestales: se pueden reconocer zonas de selvas altas y medianas (1,308.48 hectáreas de superficie), manglar (77.61 hectáreas de área) y otras áreas forestales no especificadas (85.66 hectáreas) (CONAFOR, 2013).
- Estado de la vegetación: La vegetación más conservada se encuentra cercana a la costa con valores más cercanos a 1 de NDVI, gradualmente los valores disminuyen conforme se aumenta en elevación, pendiente y se aleja de la franja litoral (Se obtuvo con Google Earth Engine en una imagen Sentinel-2 de 2021).
- Biodiversidad: se identificaron 243 especies marinas, 51 macroalgas bentónicas, una fanerógama, 186 invertebrados y 5 vertebrados (Casasola et al., 2002; Martos, 2010; de la Cruz-Francisco et al., 2017; Rojas-Baños et al., 2022).
- Tipología de la línea de costa: se pueden observar secciones abrasivas en los bloques levantados con playas interdigitizadas cercanas a la desembocadura y en el litoral Norte del municipio (Mancera et al., 2020).
- Datos mareográficos y de oleaje: Se reconocen tres direcciones predominantes de viento (NE-SW, E-W, SE-NW), que generan alturas de ola en promedio de 0.5 a 1.5 m, en primavera y otoño, y de 1.5 a 4 m, en verano e invierno. El régimen de mareas es diurno, con una oscilación promedio de 0.06975 m; la pleamar en promedio es

de 0.85025 m y la bajamar es de -0.7805 aproximadamente (Servicio Mareográfico Nacional, 2017; Mancera et al., 2020).

- Tenencia de la tierra: se divide en tierras comunales, asentamientos humanos y núcleos agrarios parcelados (RAN, 2018).

Del mismo modo, se presentan las características del subsistema social-económico

- Población: 24,421 habitantes (51.50% mujeres), distribuidos en 70 localidades; principales: Cazones de Herrera (4,773 hab.) y La Unión (1,824 hab.) (INEGI, 2020).
- Densidad de población: Más alta en el sur y media en localidades extensas; baja densidad al norte.
- Distribución por grupos de edad y sexo: 15,135 adultos (15-64 años), 6,618 niños (0-14 años), y 2,666 mayores (65+). Relación hombres/mujeres: 0.94 (INEGI, 2020).
- Crecimiento demográfico: Incremento de 800 habitantes entre 1995-2020; mayor tasa entre 2015-2020 (0.62%), todos los periodos se desarrollan en tasas positivas a excepción del periodo entre los años 2000 y 2005 donde la tasa de crecimiento fue del -0.58 % (CEIEG, 2021).
- Escolaridad: 101 escuelas, 367 docentes; analfabetismo del 10.7%; grado promedio de 7.58 años (INEGI, 2020).
- Población Económicamente Activa: 11,320 personas, 47.5% en sector primario, 12.6% secundario, 39.3% terciario (INEGI, 2020).
- Población perteneciente a un grupo indígena: 6,026 en hogares indígenas; 2,726 hablantes de lengua indígena (11.79%) (INEGI, 2020).
- Grado de marginación y desigualdad: grado alto, con un índice de 51.7 (CONAPO, 2021). Ocupa el lugar 62 en el contexto estatal y el 605 en el contexto nacional. A nivel localidad hay dos localidades con grado muy alto de marginación que son Cerro Grande y La Unión Chiquita. El grado de rezago social del municipio aumento de

medio a alto entre 2010 y 2015 (CONEVAL, 2015a) y el 68.8% de su población es considerada en situación de pobreza (CONEVAL, 2015b).

En el subsistema jurídico-administrativo, en los instrumentos legislativos relacionados con el litoral, se observa una desconexión entre la parte terrestre y la marina. La LGEEPA incluye componentes de planificación y gestión costera que otorgan jurisdicción a los municipios para proponer estrategias que abarcan desde la zona terrestre hasta la Zona Económica Exclusiva. La Ley Nacional de Aguas, crucial para el manejo de problemáticas marinas, conecta con lo terrestre al abordar la dinámica de las cuencas exorreicas. Asimismo, la Ley Estatal de Protección Ambiental de Veracruz establece estrategias para el ordenamiento ecológico.

Como parte de la fase de diagnóstico, se identificaron elementos de presión, estado y respuesta, los elementos de presión (stress) son los que pueden perjudicar los recursos costeros, el estado describe las condiciones ambientales favorables, mientras que la respuesta es la reacción a problemas o amenazas costeras (Barragán, 2003). Como elementos de presión se utilizaron el grado de marginación, las vertientes escarpadas mayores a 17 grados, la vegetación con NDVI negativo y las características de uso de suelo antrópicas. Por otra parte, las variables de estado utilizadas fueron el río cazones, las zonas con NDVI positivo y los usos de suelo con remanentes de vegetación. Como componente de respuesta se agrega la Unidad de Gestión Ambiental (UGA) 161 del ordenamiento marino y costero del Golfo de México. Cada característica (presión, estado y respuesta) fue obtenida conforme a álgebra de mapas entre las variables mencionadas, para en última instancia sobre ponerlas y dar como resultado la figura 4. Se puede observar la marcada influencia antrópica propiciada por la actividad agrícola, mientras que las áreas naturales con un estado de oportunidad favorable son el río cazones y la vegetación cercana a la costa.

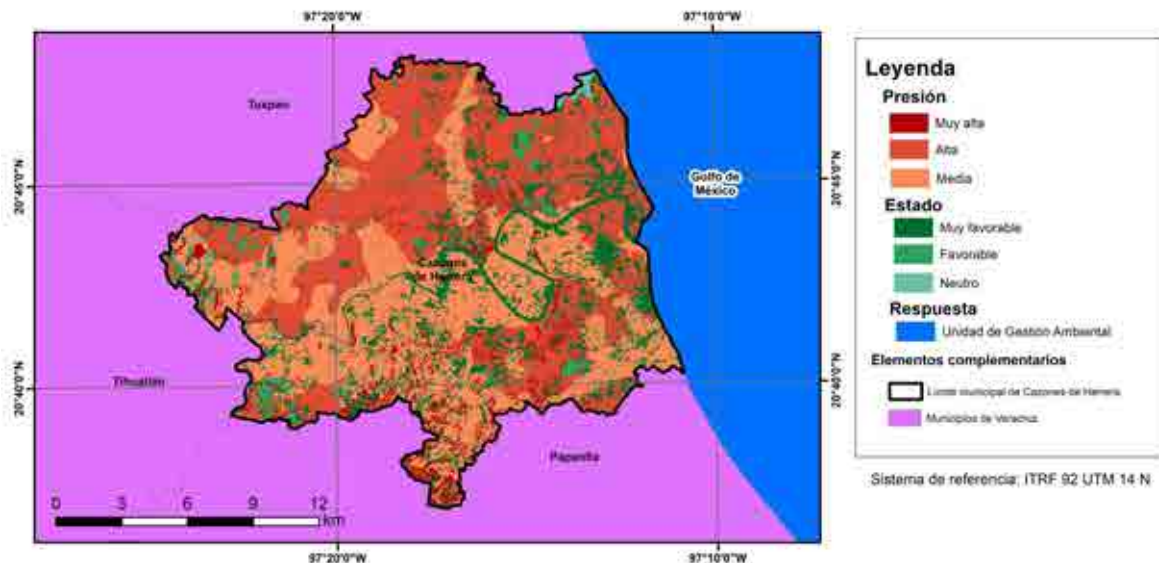


Figura 4. Modelo presión-estado-respuesta de Cazones de Herrera

Fuente: Elaboración propia.

Se elaboró un análisis de cambio de cobertura de suelo a partir de imágenes Landsat 8, con una nubosidad menor a 25%, de los años 2013 y 2021. Las imágenes se procesaron bajo una clasificación supervisada, se tomaron puntos de muestra espectral conforme a la clasificación de CONAFOR (2013), Con estos puntos se obtuvieron las firmas espectrales en la imagen más antigua y se clasificó bajo el algoritmo de máxima verosimilitud. Para la imagen 2021 (más reciente) se utilizaron las mismas firmas para que la clasificación fuera homogénea y pudiera dar resultados interpretables (Figura 5).

Se utilizó el Land Change Modeler en la plataforma Terrset, de donde se obtuvieron los resultados de cambio. Se puede apreciar como las mayores pérdidas se dieron en los terrenos agrícolas con 3,473 ha y en la selva con 2,668 ha, ante un aumento de asentamientos humanos (1,504 ha) y pastizales (995 ha) (Figura 6). La clasificación coincide en su mayoría con el Registro Agrario Nacional (2018), que ubica en gran medida al municipio como un núcleo agrario con la mayor superficie lotificada, sin embargo, a lo largo de este periodo de análisis se reconoce que estas áreas se han perdido como resultado

probablemente del abandono de subsidios del campo por las instituciones, mientras que la mayor parte de los pastizales son utilizados como terrenos para la ganadería.

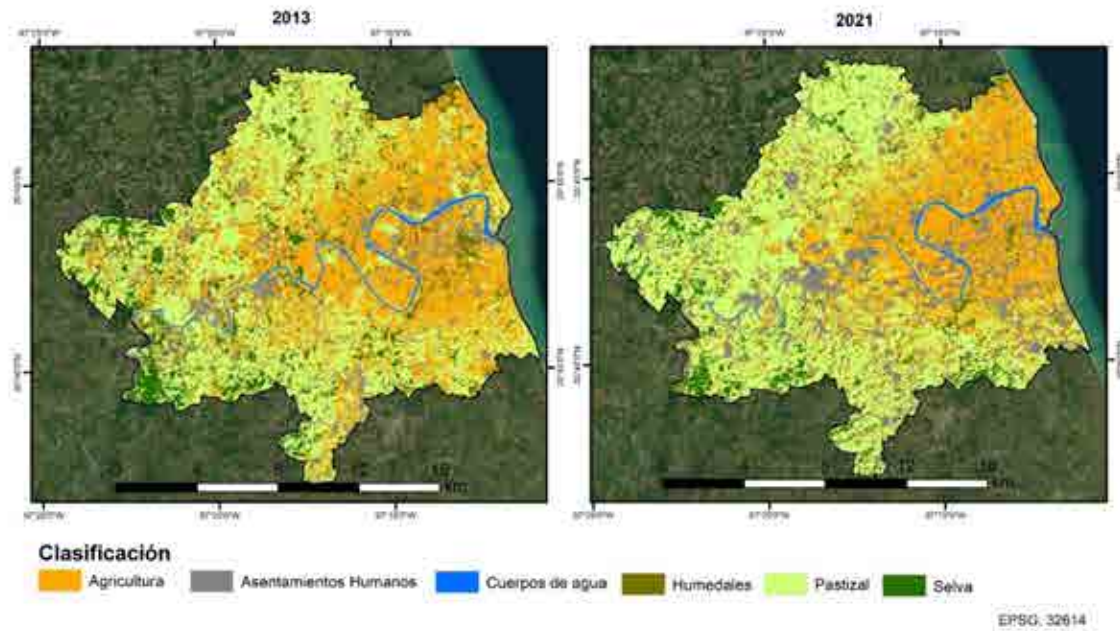


Figura 5. Clasificaciones supervisadas sobre imágenes Landsat 8.

Fuente: elaboración propia.

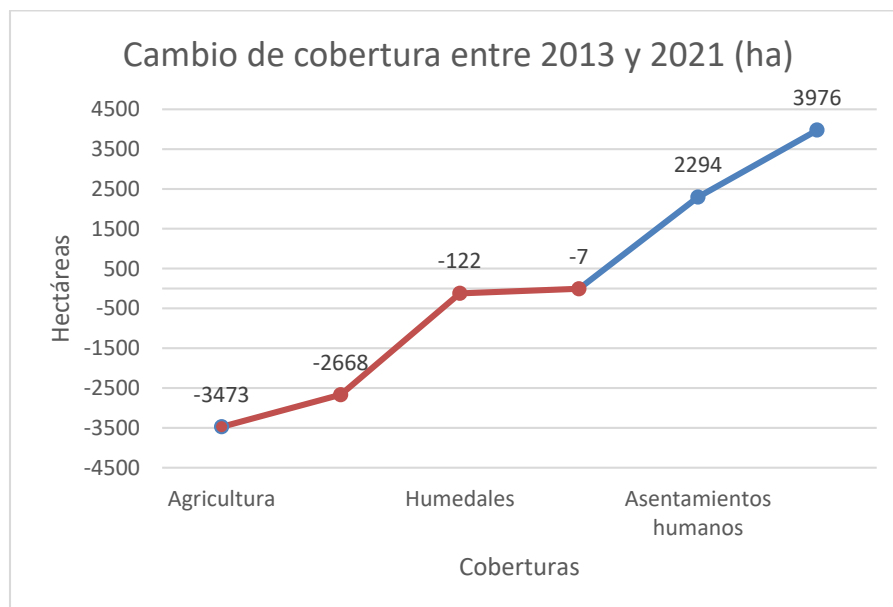


Figura 6. Cambios netos en hectáreas para el periodo 2013-2021.

Fuente: Elaboración propia.

Para englobar todo el diagnóstico, se elaboró un análisis de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas (Tabla 2).

Tabla 2. Análisis FODA

Fortalezas	Oportunidades
-Presencia de recursos naturales con potencial de conservación como arrecifes y manglar. -Superficie de suelo con influencia antrópica (agricultura) pero sin asentamientos. -Atractivos turísticos de bajo impacto como el río, el campamento tortuguero, playas y arrecife Blake -Recursos económicos presentes para diversificar las actividades.	-Impulso multisectorial a la economía. -Conservación de recursos naturales de interés. -Desarrollo de turismo de bajo impacto. -Espacio para construcción de infraestructura y vías de comunicación entre localidades. -Sitios idóneos para el asentamiento humano ordenado.
Debilidades	Amenazas
-Cambio de la cobertura agrícola a pastizal. -Índices altos de marginación. -Centralización de recursos económicos en las localidades principales (Barra de Czones y Czones). -Erosión de hídrica y procesos gravitacionales costeros. -Falta de diversificación en las actividades económicas -Ausencia de servicios y equipamiento.	-Periodos de cambio muy cortos en procesos naturales debido al cambio climático. -Impactos con consecuencias multi-sectoriales, sociales y ambientales debido a la naturaleza litoral. -Contexto socio-político de la zona de estudio. -Ausencia de Cohesión social debido al fenómeno migratorio. -Asentamientos irregulares. -Contaminación del Río Czones

Fuente: Elaboración propia

Conforme al escenario actual, la tendencia es que a falta de una visión integral del ordenamiento del territorio que incluya los componentes ambientales, sociales y económicos; el municipio de Czones de Herrera crezca en sus centros urbanos de manera periférica a las localidades principales, que las zonas con potencial de preservación y/o protección se degraden y, que los recursos y servicios ambientales no sean aprovechados de manera equilibrada. Del mismo modo, el obviar las interacciones terrestres y marinas de la zona costera, implica negar el valor ambiental, social y económico que tienen estos entornos, además de ignorar las complejas problemáticas generadas por el cambio climático y la degradación ambiental acentuada en la actualidad.

3.3. Etapa propositiva.

La etapa propositiva consiste en las estrategias a tomar conforme al diagnóstico, se parte de dos premisas: 1) determinar unidades estratégicas territoriales para su ordenamiento y 2) asignar estrategias ante problemáticas.

Las Unidades Estratégicas Territoriales (UET) se definieron, en su mayoría, conforme a Barragán (2003). Debido a que el contexto mexicano difiere en cuanto a dinámicas de otras costas del mundo, se proponen también estrategias acotadas a los procesos integrales de los municipios costeros mexicanos, en particular del norte de Veracruz. Los cambios más importantes son las estrategias del orden social, se elaboró un índice con álgebra de mapas entre la densidad de población y el índice de marginación, el resultado es un indicador de la relación “marginación-densidad”, donde los valores más altos determinan poblaciones marginadas con alta densidad de población y viceversa. A su vez, se propone el término de aprovechamiento sustentable en las porciones marinas y en la parte terrestre su definición conforme a la sectorización de actividades económicas.

Se definen a continuación en orden jerárquico para esta propuesta de plan.

- **Restricción:** son áreas críticas, en el sentido de fragilidad ecológica o de riesgo, son zonas en donde se busca la prohibición de actividades antrópicas debido a su potencial de degradación, así como áreas que representen un peligro para la población.
- **Protección:** Surge del concepto de espacios naturales protegidos, su objetivo es la conservación de las áreas naturales en el entendido de su relación con los sistemas sociales y económicos. Se enfoca en el menor impacto negativo, en apoyo a un manejo sustentable del entorno bajo la mínima incidencia del factor antrópico.
- **Recuperación:** pretende recuperar hábitats perdidos o formas costeras originales, siempre y cuando sea factible cumplir sus objetivos, es decir, se tiene que garantizar que el proyecto no va a ser interrumpido.

- Infraestructura y programas sociales: Son las localidades con más alta relación “marginación-densidad de población”, se consideran como localidades que requieren de la intervención de programas que mejoren las condiciones de desigualdad entre las localidades del municipio y se potencie la instalación de infraestructura que permita su conectividad con núcleos centrales.
- Diversificación de usos: Aquí se encuentra la categoría intermedia de “marginación-densidad de población”, se definen como localidades que pueden enfocarse a contener actividades alternativas a los usos de suelo predominantes de su cercanía, en estas zonas es viable fomentar su desarrollo económico desde las actividades internas y sus conexiones.
- Concentración: localidades con más bajo valor de “marginación-densidad de población”, en ellas se propone aprovechar el espacio que ocupan y buscar la conectividad con otras localidades del municipio.
- Potencial ecoturístico: las localidades con esta estrategia se definen por los recursos naturales especiales que la rodean, principalmente en el ámbito costero. Se plantea que comprendan alternativas de turismo que sean sustentables y que beneficien el crecimiento económico local.
- Crecimiento controlado: se proponen zonas cercanas a localidades que tienen posibilidad de crecer, en terrenos topográficamente seguros y que se ubiquen en una zona alejada de la costa. Con el fin de conectar las localidades y tengan una gestión homogénea.
- Bienes demaniales: son los bienes de dominio público, en especial hacen referencia a las playas donde la población puede tener acceso e intervención libre. La principal desventaja de esta categoría es la presión de las actividades económicas.
- Aprovechamiento sustentable: en el presente trabajo, se define como la zona litoral de jurisdicción libre para el municipio, en la cual se pueden implementar programas de diferentes actividades económicas con enfoque sustentable, además de

actividades de esparcimiento. La pesca es una de las posibles alternativas debido al arraigo de la comunidad costera que tiene con esta práctica.

- **Agricultura sostenible:** se plantea desarrollar y promover la agricultura sostenible como una estrategia para garantizar la seguridad alimentaria local-municipal, al mismo tiempo que se fomentan ecosistemas saludables y se apoya la gestión sostenible de los recursos naturales, la tierra y el agua. La cual debe satisfacer las necesidades actuales y futuras de productos y servicios, plantea asegurar la rentabilidad económica, la salud ambiental y la equidad social y económica dentro del ámbito.
- **Ganadería sustentable:** conjunto de prácticas que promueven la productividad y el bienestar de los ganaderos y del ganado, minimizando los impactos ambientales. Entre las estrategias destacan el Sistema Silvopastoril, el Pastoreo Racional, el Pastoreo Rotacional Intensivo, el Manejo Holístico y la Ganadería Diversificada. Estas prácticas incrementan la disponibilidad de forraje mediante la combinación de pastos con árboles y arbustos de uso múltiple, lo que permite una mayor densidad de ganado en lapsos más cortos.

Para poder ubicar las estrategias espacialmente se definieron criterios con base en la información cartográfica recabada en las etapas anteriores, los criterios de cada Unidad Estratégica Territorial (UET) se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Criterios para la delimitación de las Unidades Estratégicas Territoriales

Unidades Estratégicas Territoriales	Criterios
Restricción	• Vegetación de Manglar • Vegetación de Tular • Inclinaciones mayores a 17° • Costa con morfodinámica erosiva • Zonas altas con remanentes de selva baja
Protección	• Vegetación de Selva alta • Valores altos de NDVI • Costas con coral emergente • Zona de arribo de tortugas

	• Arrecife emergente Blake
Recuperación	• Zonas de pérdida de vegetación • Suelos de tipo cambisol • Buffer de la zona de manglar • Áreas desprovistas de vegetación cercanas a remanentes
Infraestructura y programas sociales	• Localidades con más bajo índice de marginación*densidad
Diversificación de usos	• Localidades con índice medio de marginación*densidad
Concentración	• Localidades con alto índice de marginación*densidad
Potencial ecoturístico	• Localidades costeras sin restricciones o zonas de protección cercana
Crecimiento controlado	• Relieve regular • Cercanía a centros de población de medio índice marginación densidad
Bienes demaniales	• Playas acumulativas • Zona de mar territorial sin restricciones o actividades asignada
Aprovechamiento sustentable	• Zona marina que comprende el Mar Territorial
Agricultura sostenible	• Zonas de topografía sub-horizontal • Tipo de suelo phaeozem • Registro de unidades agrarias en el RAN • Agricultura según las clasificaciones de cobertura de suelo • Tierras parceladas registradas en el RAN
Ganadería sustentable	• Cambios de cobertura de suelo a pastizal

Fuente: Elaboración propia

El mapa resultante conforma la propuesta de zonificación de estrategias, se presenta separado en 2 partes (Figuras 7 y 8) debido al formato, el geoportal de consulta resultante ofrece una alternativa a la limitante de impresión.

Además de las UET, se definieron las problemáticas del municipio conforme a las debilidades y amenazas reconocidas en el análisis FODA, conforme a estas se definieron las estrategias de solución derivadas de Barragán (2003), las cuales fueron descritas como propuestas en la tabla 4.

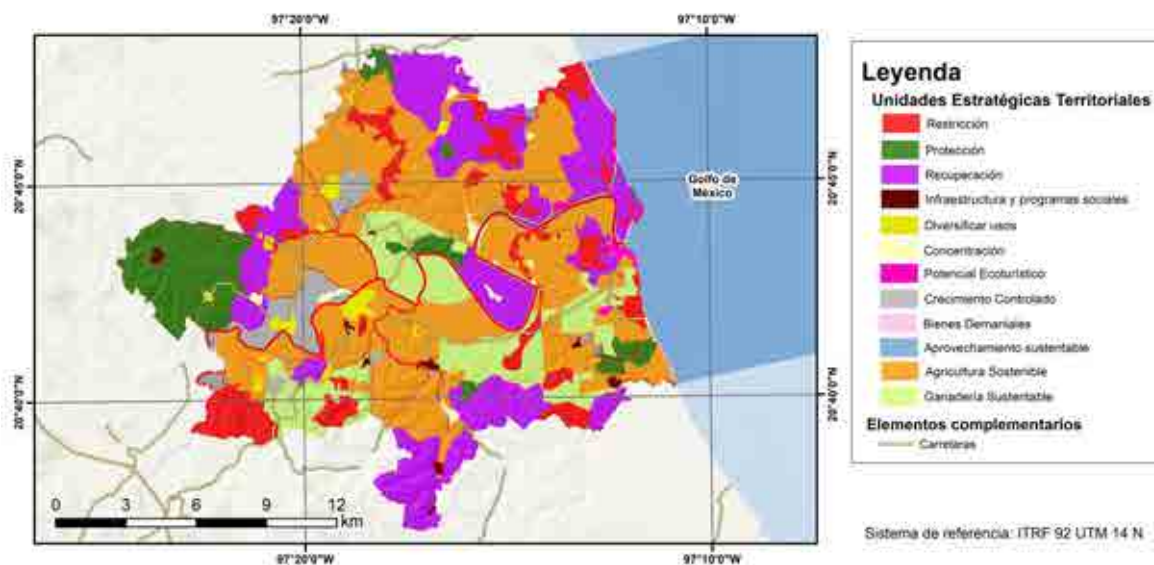


Figura 7. Unidades Estratégicas Territoriales.

Fuente. Elaboración propia.

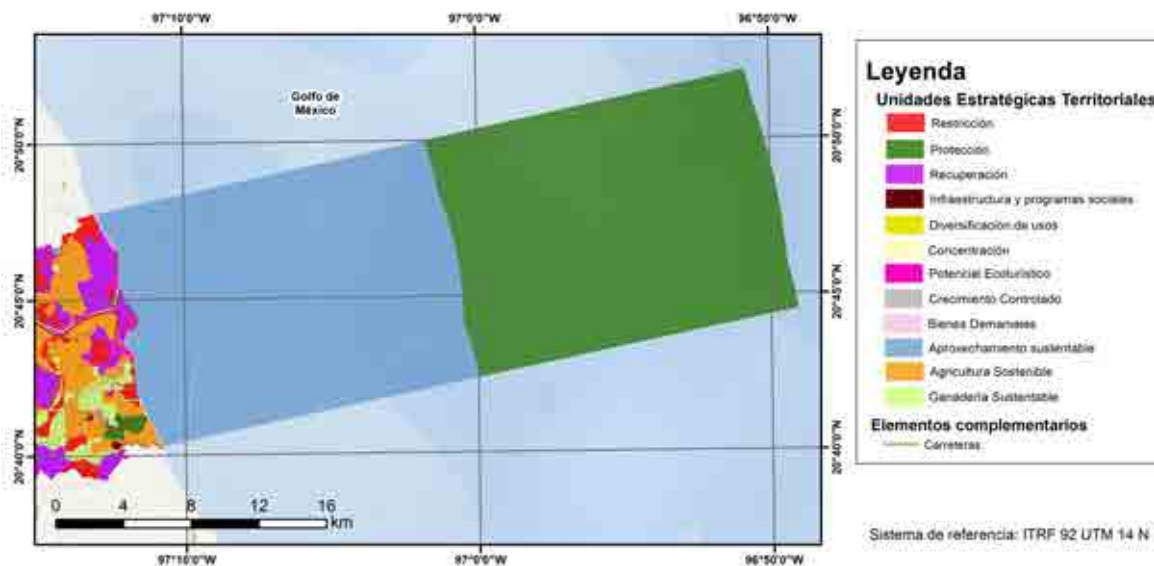


Figura 8. Unidades Estratégicas Territoriales.

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 4. Problemática del municipio y estrategias de solución.

Problemática	Estrategia	Descripción
Cambio de la cobertura agrícola a pastizal.	Ordenación en profundidad	Definir las zonas más impactadas por el cambio en la cobertura de suelo y determinar acciones de sectorización sustentable.
Índices altos de marginación.	Ordenación en profundidad	Determinar para cada localidad la estrategia específica según la tendencia generalizada de concentración de usos y actividades sectoriales.
Centralización de recursos económicos en las localidades principales (Barra de Cazones y Cazones).	Ordenación en profundidad	Alternar y diversificar usos y actividades antes que colmar con asentamientos.
Erosión de hídrica y procesos gravitacionales costeros.	Restricción	Conforme a las zonas de peligro, restringir el acercamiento a las zonas más inestables tanto de las costas acantiladas como de los bordes del río Cazones.
Falta de diversificación en las actividades económicas	Ordenación en profundidad	Identificar las actividades económicas primarias y proponer su ejecución sustentable
Ausencia de servicios y equipamiento.	Ordenación en profundidad	Favorecer el crecimiento de asentamientos consolidados que eviten la dispersión.
Periodos de cambio muy cortos en procesos naturales debido al cambio climático.	Protección	Conforme a los recursos más importantes y los asentamientos humanos, crear protocolos de protección civil y de mitigación.
Impactos con consecuencias multi-sectoriales, sociales y ambientales debido a la naturaleza litoral.	Recuperación	Reconocer las zonas más impactadas para proponer estrategias de recuperación y remediación
Contexto socio-político de la zona de estudio.	Ordenación a profundidad	Generar cohesión social conforme a programas de apoyo comunitario

Ausencia de Cohesión social debido al fenómeno migratorio	Ordenación a profundidad	Programas de comunicación comunitaria
Asentamientos irregulares.	Compra de tierras/retirada controlada	Regularizar lo irregular
Contaminación del Río Cazonas	Recuperación	Proyecto de biorremediación con humedales móviles.

Fuente: Elaboración propia

4. Discusión

El plan de ordenamiento territorial integral costero presente se entiende desde la interrelación de sus tres etapas: previa, analítica/diagnóstico y propositiva, así como desde sus componentes físico, natural, social, económico y político administrativo. La etapa previa es una forma de abordar el espacio geográfico desde información que no se suele integrar en los estudios oficiales en el ámbito Nacional o Estatal debido a su carácter cualitativo y semi-cuantitativo, pero que permite el conocimiento del entorno desde fuentes no oficiales. La etapa de análisis funciona a la par del diagnóstico: se analizan los datos duros del territorio que permiten diagnosticar las condiciones del municipio para su ordenamiento y las problemáticas que enfrenta. Por último, la etapa propositiva complementa el plan y le da el carácter de acción, previo a la gestión que no es parte de los objetivos del presente trabajo, pero es el mecanismo complementario.

Para complementar este trabajo hacia una etapa de gestión, se requiere la enumeración de las Unidades Estratégicas Territoriales (UET) de manera específica, para identificar propuestas a cada porción particular del territorio. Este objetivo se puede lograr con la vinculación de los resultados obtenidos con talleres sectoriales, que permitan conocer los intereses de los diferentes estratos del municipio (comunidad, gobierno, academia, organizaciones locales, etc.).

El presente trabajo conforma una propuesta de ordenamiento de los asentamientos humanos conforme a las condiciones de marginación y densidad de población de las localidades, sus recursos naturales y costeros con potencial de aprovechamiento, además

de las zonas idóneas (en cuestión de topografía y cercanía) para su crecimiento. A su vez, se busca impulsar la conectividad entre las localidades desde el punto de vista de desarrollo social y económico local.

Existen ejercicios enfocados en la planeación y gestión integral de zonas costeras, como la compilación de Milanés-Batista et al. (2019). Esta obra presenta aplicaciones del enfoque integral en la planificación y gestión de áreas litorales. Se vuelve evidente que el ordenamiento territorial está más asociado a la planeación, mientras que la gestión incluye en su mayoría complementos de política pública. Resalta entonces la diferencia entre ordenamiento territorial integral y gestión de la zona costera integrada, mientras que el primero aborda el ordenamiento en términos de planeación y propuesta de estrategias, la gestión integral se refiere al proceso completo, desde las caracterizaciones hasta la aplicación.

Desde Barragán, conforme a una propuesta de plan integral de ordenamiento territorial costero (sin contar la parte de gestión), los esfuerzos aplicados bajo esa rúbrica se asemejan al manejo costero integrado. Los trabajos en costas de Colombia (Guerra-Barrios y Olaff-Puello, 2018), el caso de Akumal (Vázquez et al., 2020), el caribe guatemalteco (Caviedes et al., 2021), entre otros; se enfocan principalmente a la formulación de estrategias a manera de planificación, carecen en algunos casos del componente espacial lo cual hace la diferencia entre el manejo integral y el ordenamiento integral de la zona costera.

La metodología de Barragán (2003), tiene como virtud integrar los componentes de la sustentabilidad (ambiental, económico y social) e insertar el tema jurídico-político. A su vez, la integralidad de enfoques también se ve reflejada en complementar la porción terrestre con la marina. La metodología tiene una importante perspectiva a ordenar lo costero, como tal da una amplia gama de posibilidades para identificar las dinámicas que suceden entre el mar y la tierra.

La metodología no se presenta cerrada, sino que se complementa con la realidad y el contexto de los espacios geográficos particulares, en este caso de las costas del norte de

Veracruz. Esta versatilidad hace que la metodología destaque también como un elemento de conexión entre el proceso de planeación y la posterior gestión, al estar abierta al ajuste jurídico y participativo para su implementación como política pública. Además de poder adaptarse a las nuevas tecnologías en su proceso de difusión como fue la estructuración del geoportal del presente trabajo.

La mayor limitante identificada en este estudio fue la disponibilidad de insumos, su calidad y su escala. La diversidad de elementos a tomar en cuenta para proponer estrategias de ordenamiento territorial impiden que todos los insumos puedan ser trabajados por igual, hay casos en donde la actualización de los datos es cada 10 años (Censo de Población y vivienda), otros que no tienen periodos de actualización fijos (cartas del medio natural), en otros casos la escala no es local (carta geológica 1:250,000) y en otros la calidad depende mucho de los sensores (imágenes satelitales de diferentes años y periodos durante el año).

Frente a la complicación anterior, lo ideal es rectificar las propuestas, tanto de unidades estratégicas territoriales como de problemáticas, bajo una perspectiva comunitaria, donde las realidades de los habitantes del municipio de Cazones de Herrera complementen los diagnósticos cartográficos y los pobladores se envuelvan con su municipio desde lo social y lo ambiental, en miras de una interacción sustentable con su entorno, una mejor relación entre localidades, con miras en un desarrollo económico sustentable y local.

5. Conclusiones

La propuesta de plan de ordenamiento territorial integral costero del municipio de Cazones de Herrera ha desarrollado estrategias que buscan asegurar la protección y preservación de los recursos naturales, al enfocar las posibles actividades económicas a zonas de bajo impacto negativo y dar alternativas para su aplicación sustentable. Se destaca el potencial de manejo costero que se puede desarrollar asociado a las particularidades poco degradadas de la costa. Se recomienda la conectividad de las localidades con el fin de generar programas de integración que favorezcan el desarrollo económico local.

La metodología presenta ventajas y desventajas, fue necesario ajustar componentes al caso de la costa norte del Estado de Veracruz para dar resultados congruentes con el municipio de Cazones de Herrera. La metodología aplicada integra los componentes de la sustentabilidad y los asocia en busca del equilibrio costero, entre lo físico-natural, lo social y lo político-administrativo. A su vez da una propuesta para elaborar planes de ordenamiento territorial que tomen lo terrestre y lo marino bajo el mismo enfoque. El esfuerzo de agregar lo marino a ordenamientos en escalas locales queda como un punto a solventar para que el sistema litoral y sus interconexiones se representen de mejor manera.

Es fundamental complementar el presente trabajo con un enfoque comunitario que acerque el plan de ordenamiento a la población y a su realidad. Del ambiente se aprende y la sociedad aprehende su naturaleza. Bajo un enfoque de planeación integral, esta aprehensión plantea beneficios en cuanto a servicios ecosistémicos, económicos y sociales, con miras en la reducción de la desigualdad y el mantenimiento del entorno natural. El presente trabajo es una aportación para entender la dinámica interconectada del ambiente y proponer estrategias para una posible gestión de la zona costera, con miras en el equilibrio social y ecológico.

Agradecimientos

A la Maestría en Ciencias del Ambiente de la Universidad Veracruzana y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), marco en el cual se desarrolló esta investigación.

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

6. Referencias

Barragán Muñoz, J.M. (2003). *Medio Ambiente y Desarrollo en Áreas Litorales. Introducción a la Planificación y Gestión Integradas*. Universidad de Cádiz: Servicio de publicaciones, 306 pp.

Carrión, A., Vieyra, A., Arenas, F., & Alvarado, V. (2020). Políticas y prácticas de ordenamiento territorial en América Latina. *Revista de Geografía Norte Grande*, (77), 5-10.

Caviedes, V., Arenas-Granados, P., & Barragán-Muñoz, J. M. (2021). Avances para el manejo costero integrado en el Caribe de Guatemala. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(2), 254-275.

CEIEG Veracruz. (2021). *Cuadernillos municipales: Cazones de Herrera*. Gobierno del Estado de Veracruz.

Chávez S. (2023). Franja costera y sus ecosistemas: problemática y su importancia. *Recursos Naturales y Sociedad*, Vol. 9 (1): 49-63.
<https://doi.org/10.18846/renaysoc.2023.09.09.01.0005>

CONABIO. (2015). *Política nacional de mares y costas de México. Gestión integral de las regiones más dinámicas del territorio nacional*. México, 7-11.

CONAFOR. (2013). *Inventario Estatal Forestal y de Suelos – Veracruz de Ignacio de la Llave*.

CONAPO (2021). *Grado e Índice de Marginación 2020*. Consejo Nacional de Población.

CONEVAL. (2015a). *Índice y grado de Rezago social 2015*. Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social.

CONEVAL. (2015b). *Porcentaje de Pobreza 2015*. Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social.

Criollo, F. J. G., & Rojas, Y. E. T. (2024). Diagnóstico del Manejo Integrado de la Zona Costera de Nicaragua. *JAINA, Costas y Mares ante el Cambio Climático*, 1(1), 45-60.

De Andrés, M., Barragán, J. M., Granados, P. A., & Onetti, J. G. S. J. G. (2020). Gestión de las Zonas Costeras y Marinas en España. *Revista Costas vol esp*, 1, 117-132.

De la Cruz-Francisco, V., Orduña-Medrano, R. E., Paredes-Flores, J. E., Vázquez-Estrada, R. I., González-González, M., & Flores-Galicia, L. (2017). Una aproximación a la florística y faunística de la costa rocosa El Pulpo, Cazones, Veracruz, México. *CICIMAR Océánides*, 32(1), 39-58.

De la Cruz Mera, Á., & Chornet, M. I. M. (2019). Los Instrumentos de Ordenación del Territorio en España. Estudio comparado de la legislación y los instrumentos vigentes. *Ciudad Y Territorio. Estudios Territoriales*. Vol. LI, Nº 199, primavera 2019 ISSN(P): 1133-4762, ISSN(E): 2659-3254. Pp. 175-200.

Díaz-Mondragón, S., D. Pedroza-Páez, L. A. Bojórquez-Tapia, A. J. Díaz de-León, (2021). Contribution of Marine Spatial Planning in Mexico to Marine and Coastal Management. *Revista Costas*, vol. esp., 2: 75-90. doi: 10.26359/costas.e0421.

DOF. (1986). Ley General del Mar.

DOF. (2016). *Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano*. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5462755&fecha=06/01/2025

DOF. (2022). *Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente*.

Guerra Barrios, T., & Puello Castillo, O. (2018). *Propuestas estratégicas para el manejo de la zona costera entre Manzanillo del Mar y Punta Canoa ante los efectos adversos del desarrollo urbano-rural y el cambio climático*.

Hernández Santana, J.R., A. P. Méndez Linares y A. Ordaz Hernández. (2022). Energía Undimotriz en la Costa Veracruzana, México. Una Evaluación Geólogo-Geomorfológica de Sitios Idóneos para el Emplazamiento de Prototipos Ingenieriles. Cemie-Océano, Universidad Autónoma de Campeche. 375 p. doi 0.26359/EPOMEX.CEMIExx2021

INE. (2000). *El Ordenamiento Ecológico del Territorio. Logros y retos para el desarrollo sustentable. 1995-2000*. Instituto Nacional de Ecología, Dirección General de Ordenamiento Ecológico e Impacto Ambiental. 174 pp.

INEGI. (2010). *Red hidrográfica escala 1:50, 000*. Aguascalientes, México.

INEGI. (2013). *conjunto de datos vectoriales edafológico derivado de la carta edafológica serie II escala 1:250,000*.

INEGI. (2019). *Cartas topográficas escala 1:50,000 claves F14D55, F14D56, F14D65 y F14D66*. Aguascalientes, México.

INEGI. (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Aguascalientes, México.

Infante Pacheco, V. E. & Cervantes Pérez, J. (2022). Assessment of the hydric, demographic, and economic sustainability of the coastal cities of Veracruz, Mexico: a look to the future. *Sostenibilidad: económica, social y ambiental*, 5, 37-52.
<https://doi.org/10.14198/Sostenibilidad2023.5.03>

IPCC. (2013). *Cambio climático 2013, bases físicas: Resumen para responsables de políticas*. OMM y PNUMA, Suiza, 23-24.

Juárez-Aguilar, E. A., Sánchez-Beristain, F., & Bernal, J. P. (2019). Determination of the temperature of precipitation of aragonite in shells of *Anadara brasiliana* (Lamarck, 1819) from Playa Norte, Cazones de Herrera (Holocene, Veracruz, Mexico) by means of trace element analysis. *Journal of South American Earth Sciences*, 91, 71-79.

Mancera Flores, A., Morales Méndez, D., Saavedra Gallardo, E., Hernández Santana, J. R., & Méndez Linares, A. P. (2020). Morfodinámica de las costas septentrionales del estado de Veracruz, México: tendencias en las últimas cuatro décadas (1973-2017). *Investigaciones geográficas*, (103).

Martos J. (2010). *Evaluación De La Salud De Los Corales Del Arrecife Blake, Cazones, Veracruz*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias del Ambiente. Universidad Veracruzana.

Milanés Batista, C., Lastra Mier, R. E., & Sierra Correa, P. C. (2019). *Estudios de caso sobre manejo integrado de zonas costeras en Iberoamérica: gestión, riesgo y buenas prácticas*.

Olmedo-Muñoz, M., & Morales, D. (2024). Elaboración de un Sistema De Información Geográfica y Geoportal de Pobreza y Desigualdad en Sonora, México. *INVURNUS*, 19(1). <https://doi.org/10.46588/invurnus.v19i1.106>

Ramírez, A. G., Cruz, A., Morales, N., & Monterroso, A. I. (2016). El ordenamiento ecológico territorial instrumento de política ambiental para la planeación del desarrollo local. *Estudios sociales* (Hermosillo, Son.), 26(48), 69-99.

Registro Agrario Nacional. (2018). Capa vectorial de Nucleos Agrarios. En <https://datos.ran.gob.mx/conjuntoDatosPublico.php>

Rivera-Guzmán, N. E., Moreno-Casasola, P., Ibarra-Obando, S. E., Sosa, V. J., Herrera-Silveria, J., (2014). Long term state of coastal lagoons in Veracruz, Mexico: Effects of land use changes in watersheds on seagrasses habitats. *Ocean & Coastal management*, 87, 30-39.

Rojas-Baños, J., Ramírez-Bautista, A., & Moreno-Lara, I. Anidación De La Tortuga Verde, *Chelonia Mydas* (Cheloniidae) En Playa Chaparrales, Cazones, Veracruz. *Revista Latinoamericana de Herpetología*, 5(3).

Rosete, F. (2006). *Semblanza histórica del ordenamiento ecológico territorial en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.

Rosete, F. Morales, G. M., & Villalva, M. (2019). La planeación territorial en municipios costeros y su importancia para la adaptación al cambio climático global. *JAINA, Costas y Mares ante el Cambio Climático*, 1(1), 25-40.

Sala, A. (2002). El Fenómeno Migratorio De Comunidades Totonacas De Cazonas, Veracruz, Hacia Estados Unidos. *Revista de Antropología Experimental*. ISSN 1578-4282.

Sanabria Pérez, S. (2014). La ordenación del territorio: origen y significado. *Terra*, 30(47), 13-32.

Servicio Mareográfico Nacional. (2017). Datos de las estaciones mareográficas de Veracruz. UNAM, Instituto de Geofísica. Recuperado el 17 de junio de 2022 de <http://www.mareografico.unam.mx/portal/index.php?page=Estaciones>.

Servicio Meteorológico Nacional. (2010). *Normales Climatológicas*.

Silva-Casarín, R. S., Martínez, M. L., Moreno-Casasola, P., Baldwin, E. M., López-Portillo, J., Lithgow, D., & Tamborrell, M. B. (2017). *Aspectos generales de la zona costera*. In Inecol Vol. 1.

SEDATU, SEMARNAT & GIZ. (2017). *Guía Metodológica. Elaboración y Actualización de Programas Municipales de Desarrollo Urbano*. Ciudad de México. Primera Edición. 252 pp.

SEMARNAT (2007). *Estrategia Nacional para el Ordenamiento Ecológico del Territorio en Mares y Costas*. Colección Legal. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 28 pp

SGM. (2004). *Carta Geológico Minera escala 1:250,000 clave F14-12*.

UNESCO. (2003). The Integrated Strategic Design Plan for the ocean observations module of the Global Ocean Observing System. *GOOS REPORT N° 125*. IOC Information Documents Series No. 1183, 56-59.

Origen, tendencias y desafíos de la geoconservación

Origin, trends and challenges of geoconservation

Luis Miguel Espinosa Rodríguez ¹, Miguel Ángel Balderas Plata ¹, José Juan Cano Delgado ²,
Verónica Leticia Sámano Corrales ^{1*}

¹ Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México, Cerro Coatepec
s/n Ciudad Universitaria, Toluca Estado de México C.P. 50110., lmespinosar@uaemex.mx,
mabalderasp@uaemex.mx, vsamanoc407@alumno.uaemex.mx, <https://orcid.org/0000-0002-9545-400X>, <https://orcid.org/0000-0003-2889-3923>, <https://orcid.org/0009-0000-9924-3544>.

² Escuela Universitaria de Turismo de Santa Cruz de Tenerife, C. Jose Zarate Y Penichet, 5,
CP. 38001 Santa Cruz de Tenerife, España, jjcanodelgado@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6735-2033>

*Autor de correspondencia

Recibido: 04/12/2024. Aceptado: 07/01/2025. Publicado: 21/01/2025.

Cómo citar: Espinosa Rodríguez, L., Balderas Plata, M., Sámano Corrales, V., & Cano Delgado, J. (2025). Origen, tendencias y desafíos de la geoconservación. *Geografía Aplicada*, 1(1), 139-167. Consultado de <https://geografiaaplicada.uaemex.mx/article/view/25623>

Resumen

El presente trabajo tiene por objeto establecer las características principales de la geoconservación como primordial fundamento, donde a través del entendimiento de su origen, tendencias y desafíos que conlleva, conduzca al establecimiento de una propuesta para el desarrollo sustentable a partir de la riqueza y de los valores de patrimonio, que se le ha otorgado a diversos elementos geológicos y geomorfológicos (geodiversidad) en sitios de interés, los cuales en algunos casos, se han convertido en geoparques. A partir de una revisión bibliográfica se realiza un análisis de las características polisémicas de la conservación, así como de las tendencias y desafíos de este “novo” paradigma en el ámbito internacional; encontrándose que, si bien esta idea de conservación se ha consolidado en los últimos veinticinco años, aún falta esclarecer y resolver problemas conceptuales, metodológicos y operativos para el manejo de la geoconservación.

Palabras clave: Desarrollo sustentable, Geodiversidad, Geoconservación, Paradigma.

Abstract

The aim of this paper is to identify the main characteristics of geoconservation as the primary architect of a proposal for sustainable development, based on the wealth and heritage values attributed to various geological and geomorphological elements (geodiversity) in sites of interest, some of which have become geoparks. Based on a literature review, an analysis is made of the polysemic characteristics of conservation, as well as the trends and challenges of this 'new' paradigm in the international arena. It is found that, although this idea of conservation has been consolidated over the last twenty-five years, conceptual, methodological, and operational problems for the management of geoconservation still need to be clarified and resolved.

Keywords: Geodiversity, Geoconservation, Paradigm, Sustainable development.

1. Introducción

Se parte de la premisa que la protección ambiental y de conservación del patrimonio geológico probablemente comenzó con el interés de preservar algunas geoformas ubicadas en diferentes partes del mundo, ya que son sitios de particular interés como la Agassiz Rock (Blackford Hill, Edimburgo), The Ayers Rock (Australia), el Parque Nacional de y sitios rupestres de Cappadocia (Anatolia central, Turquía), la caldera y el estratovolcán Teide, el Dedo de Dios y las Montañas del Fuego (Islas Canarias, España), la Ciudad Encantada (Cuenca) y la Horadada de Santander (ambas en España), los Montes Tatra (en la frontera de Polonia con la República Eslovaca), la Tartaruga de Cala (Cerdeña, Italia) entre otros múltiples ejemplos. Así como, por declaraciones específicas de protección y conservación de territorios como el sistema de cuevas de Alemania (Harz) y de Altamira, en Santander (España); el Parque Nacional de Yellowstone (Wyoming, Estados Unidos de América), en 1872, y el Parque Nacional de Banff (Alberta, Canadá), en 1885, así como, el primer inventario sueco de sitios de interés geológico y geomorfológico de 1905, la declaratoria de los primeros Monumentos Naturales de España de 1954 y las políticas particulares de protección de diferentes países europeos como Bélgica, Dinamarca, Italia, Suiza y la hoy República Checa.

De acuerdo con las experiencias internacionales, se coincide que la conformación del patrimonio y la necesidad de protección de sitios de interés geológico y geomorfológico radica, entre otras, cosas a la conceptualización del “Geoheritage”, que se define como un conjunto de estrategias, políticas y de acciones encaminadas a la conservación de la geodiversidad, a través de acciones específicas como mitigar, minimizar la degradación y proteger los valores naturales e intrínsecos del paisaje (minerales, rocas, geoformas, suelos) así como, los bienes sociales.

Se considera que el primer antecedente de la geoconservación, desde el punto de vista teórico, ha sido la geodiversidad, concepto que se acuña hoy a través de las aportaciones de diferentes autores como Flawn (1970); Strasser et al., (1995) y Gonggrijp (2000), y de

quienes influyeron en la generación de un nuevo enfoque que fue conocido en primer término como “Environmental geology”.

De acuerdo con Burek y Potter (2002 cfr. Carcavilla, 2006), fue en el año 1991 cuando se empleó por primera vez la connotación de geodiversidad (“geodiversity”) en una reunión académica de carácter internacional. Los autores referidos coinciden que esta cita fue realizada por M. Stanley (1991); sin embargo, este concepto adquirió un carácter polisémico que abanderó contextos territoriales disímiles cómo se pueden observar en la tabla 1.

Tabla 1. Conceptos de geodiversidad.

Autor (es)	Definición
Kozlowski (2004)	Variedad natural en la superficie terrestre, referida a los aspectos geológicos, geomorfológicos, suelos, hidrología, así como otros sistemas generados como resultado de procesos naturales (endógenos y exógenos) y la actividad humana.
Carcavilla <i>et al.</i> (2007)	Diversidad de rasgos geológicos presentes en un lugar, identificados tras considerar su frecuencia, distribución y evolución geológica.
Semeniuk y Brocx (2008)	Características geológicas, geomorfológicas, pedológicas, hidrológicas de una zona, desde las características estáticas, hasta el ensamblaje de productos, y procesos formativos.
Gray (2013)	Rango natural (diversidad) de características geológicas (rocas, minerales, fósiles), geomorfológicas (topografía, procesos físicos) y características del suelo e hidrológicas. Incluye, estructuras, sistemas y contribuciones a los paisajes.

Fuente: Elaboración propia.

No obstante, se han encontrado diferentes fuentes informativas que refieren a procesos conceptuales, de uso y de carácter legal, que involucran en el proceso de cuidado y conservación de geositos, geomorfositos y paisajes en el orbe; aunque no necesariamente se emplean estos conceptos, puesto que estos poseen un contexto propio de finales del siglo XX e inicios del XXI.

Entre los autores que proponen ideas referentes a la geodiversidad, se encuentran Eder (1999), Cortés *et al.*, (2000), Brilha (2002, 2005, 2013), Zouros (2004), Bruschi (2007), Fernández (2007), Carcavilla y García (2010), Bruschi *et al.*, (2011), Carcavilla *et al.*, (2011,

2012 y 2014), Burek (2012), Bratton et al., (2013), Corvea et al., (2014) y Salazar et al., (2014).

Para el caso de México Palacio et al., (2016) contribuyeron a la discusión del concepto de “patrimonio geológico” y “geoconservación” en la búsqueda de establecer conceptos unificados para la región.

2. Metodología

Para cumplir con el objetivo de este trabajo, se realizó una revisión de diversas fuentes bibliográficas publicadas en revistas científicas de las últimas tres décadas; para ello se consideraron las directrices de organizaciones vinculadas con la geoconservación.

El objetivo y metodología propuestos se circunscriben a un marco central que se enfoca a la “Gestión integrada de la geoconservación” en un contexto teórico conceptual que analiza los marcos históricos, legales y metodologías desarrolladas en diferentes países europeos y americanos e involucra una propuesta de gestión integrada, que además contribuye a proyectos de educación en geociencias de manera formal e informal, lo que ha sido calificado en el marco de esta investigación como el “tendón de Aquiles de América Latina contra las fortalezas del capital humano” en los territorios que poseen cualidades patrimoniales (Figura 1).

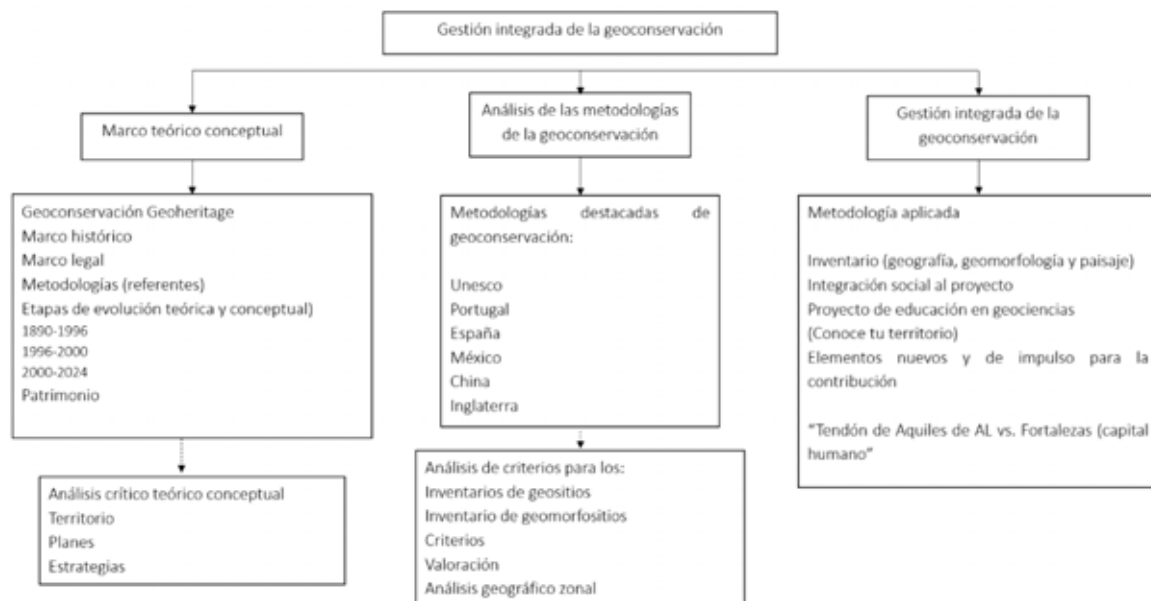


Figura 1. Diagrama genérico de la Gestión integral del paisaje.

Fuente: elaboración propia.

El marco temporal seleccionado responde a la fecha de establecimiento de la Red Global de Geoparques, en el año 2000, y la declaración de los primeros geoparques en el mundo (Alemania, España, Francia y Grecia), año a partir del cual se ha publicado el mayor volumen de resultados de investigación relacionados con la aplicación de políticas de geoconservación, tendencias actuales, retos y perspectivas de ejecución de proyectos de geoparques.

Con referencia a la revisión bibliográfica, se seleccionaron artículos científicos en las categorías de artículos originales y de revisión publicados en SCOPUS; un repositorio de acceso abierto que provee información especializada en el área de las geociencias. En la tabla 2, se exponen los criterios de búsquedas establecidos para la selección de artículos.

Tabla 2. Criterios establecidos para la selección de artículos.

Criterios de selección	Criterio de selección
Tipo de artículo	Artículo original o de revisión, indexados en el JCR que reúnen determinados requisitos de revisión por pares, y factor de impacto.

Idioma	Español, inglés o portugués
Accesibilidad	Se incluyeron artículos de libre acceso en versión texto completo.
Periodo	Años 2000 - 2024.
Términos de búsqueda	Se emplearon términos y su traducción en inglés como: conservación del patrimonio geológico (<i>conservation of geological heritage</i>), geoconservación (<i>geoconservation</i>), geodiversidad (<i>geodiversity</i>), evolución (<i>evolution</i>), desarrollo (<i>development</i>), historia (<i>history</i>), tendencias y desafíos (<i>trends and challenges</i>), obstáculos (<i>obstacles</i>).

Fuente: elaboración propia.

Proceso de extracción de datos

Para la extracción de los datos y la selección de los artículos, se introdujeron los términos más generales de búsqueda, en base a las directrices de la metodología PRISMA (Pages et al., 2022; Sánchez et al., 2022), se procedió a introducir en SCOPUS la ecuación de búsqueda ya formulada: "conservación del patrimonio geológico", "geoconservación", "geodiversidad", (en español e inglés). En segundo lugar, se añadieron otros términos tales como: "evolución", "desarrollo", "historia", "tendencias" y "desafíos", "obstáculos" y, por último, se aplicaron los criterios de inclusión. Al aplicar estos criterios, se excluyeron capítulos de libro, libros, artículos originales de acceso restringido, informes de congreso, tesis y artículos que estuvieran fuera del periodo seleccionado.

Una vez aplicados los criterios de exclusión, se procedió a evaluar el resumen (cribado) para aprobar o descartar la viabilidad de la información contenida en el artículo. Para ello, se exportó la lista de artículos al gestor bibliográfico ENDNOTE, donde se continuó el proceso de selección. Por último, se procedió a la evaluación del texto completo, al hacer énfasis en la correspondencia (resultado y discusión), los términos, la exposición y la discusión de las temáticas requeridas.

3. Resultados

En términos generales, se entiende que la geodiversidad tiene una relación estrecha con la biodiversidad y representa la base para la diversidad de la vida sobre La Tierra, es debido a que forma parte de la diversidad natural y está presente en casi todos los aspectos de la

vida diaria de las personas (Da Glória et al., 2022; UICN, 2023). Entre algunos ejemplos que se destacan como la generación de asociaciones, el desarrollo y ejecución de proyectos específicos de conservación, se encuentran los siguientes:

Tabla 2. Proyectos relacionados con geodiversidad en el ámbito mundial.

Año	País	Propuestas, acciones, grupos
1905	Holanda	Promueve la protección de lugares de interés geológico y geomorfológico.
1909	Noruega	Decreta la primera ley de protección de la naturaleza, incluye la protección de los sitios de interés geológico y mineralógico.
1961	Francia	Surge la <i>International Union of Geological Sciences</i> (IUGS).
1972	Francia	Se desarrolla un encuentro mundial con el objeto de protección de la herencia cultural y natural de la UNESCO.
1976	Kenia	Se declaran las “Áreas de geoherencia mundial”, concernientes al patrimonio geológico, biológico y cultural.
1993	Inglaterra	Se llevó al cabo la “ <i>Malvern Conference on Geological and Landscape</i> ” y el Plan “ <i>Earth Science Conservation; a strategy</i> ”.
1996	Italia	Desarrollo del primer proyecto mundial “ <i>GEOSITES</i> ” dirigido a la protección del patrimonio geológico.
1977	Reino Unido	Desarrollo del catálogo <i>Geological Conservation Review</i> (GCR) para seleccionar sitios de especial interés específico (SSSI).
1978	España	Se presenta el proyecto de Inventario Nacional de los Puntos de Interés Geológico (PIG).
1945	Holanda	Se presenta un catálogo sistemático de puntos de interés geológico.
1969	Holanda	Se formó el proyecto “GEA” para el inventario de puntos de interés geológico.
1982	Italia	En la región de Emilia Romagna se realiza un levantamiento censal censo de los Bienes Naturales.
1982	España	Se publica el “Mapa Geocientífico del Medio Natural” de de Almería, para la protección de sitios de interés.

Fuente: elaboración propia.

En este orden, se han sumado aportes de autores como Dixón (1996), Durán et al., (1998), Johansson et al., (1999), Stanley (2000), Serrano y Ruiz (2007); y a partir de las nociones de la diversidad geológica y geomorfológica, así como de las relaciones espaciales entendidas en el ámbito geográfico, se conformó la idea central de la geodiversidad, donde Carcavilla et al. (2007) la definen como un conjunto de acciones encaminadas a la preservación, gestión y conservación del patrimonio geológico de un lugar.

De manera particular, Brilha (2016) y Díaz et al. (2013), entre otros autores asumen que la geodiversidad posee diferentes valores como son:

- Científico y educativo: se fundamenta en conocer, interpretar y reconstruir la historia de la Tierra, permite el contacto directo con la geodiversidad, forma cuadros académicos profesionales y, con ello, vincula a la población en general con aspectos cognitivos y de investigación.
- Cultural: reconoce interdependencia entre el desarrollo social, cultural y / o religioso y el entorno físico que lo rodea. En este contexto, se aplica el término de “geomitología” en las relaciones socio-religiosas, espirituales y sobrenaturales.
- Económico: Reconoce el valor económico de la geodiversidad y gestiona actividades relacionadas con geoturismo.
- Estético: se relaciona con atractivos visuales tangibles e intangibles desde la perspectiva de la Geografía paisaje (Colores, tonos, amplitud visual).
- Funcional: Se comprende como la capacidad de la geodiversidad como base de sistemas físicos y ecosistémicos. Asimismo, representa un valor utilitario in situ, relacionado con la localización, infraestructura expofeso e incorpora la oferta de actividades que se pueden desarrollar.
- Intrínseco: representa las interacciones entre perspectivas filosóficas y religiosas de cada sociedad y cultura; se considera como un valor científico.

A partir de este andamiaje, se han generado planteamientos teóricos y metodológicos para comprender y evaluar las características inherentes (tangibles e intangibles), que se relacionan con estos conceptos, con el territorio y con la percepción y comprensión de la sociedad, que desembocan en propuestas como los geoparques, así como conceptos y estrategias de desarrollo local, a través de una visión global, en donde la palabra clave es el geopatrimonio (Figura 2).

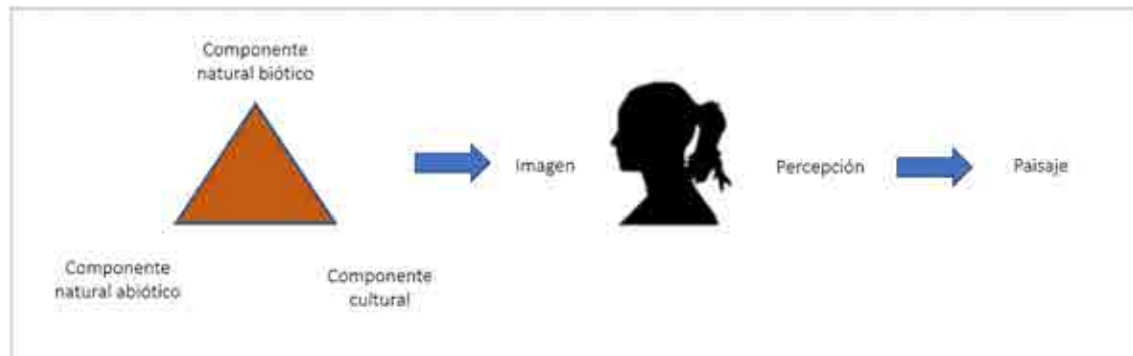


Figura 2. Integración de variables de orden natural, social y económico en la perspectiva de imagen, educación y conciencia para valorar, comprender y proteger el patrimonio geológico y geomorfológico.

Fuente: Modificada de Brilha (2013).

En síntesis, éste trata de un conjunto de elementos de la geodiversidad de La Tierra, considerados con un significativo valor científico, educativo, cultural o estético, a los que se asigna un valor que justifica la conservación (Díaz et al., 2013). Estos elementos constituyen la parte objetiva del patrimonio, mientras que el valor que se asigna a estos elementos es subjetivo.

En este orden de ideas, Crofts et al. (2019) consideran que el geopatrimonio es una especie de narración a través del tiempo, conservada en sus rocas, geoformas, fósiles, minerales y suelos, que brinda un fuerte argumento a favor de la geoconservación.

Al respecto, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) establece: “la necesidad de un cambio significativo en las actitudes humanas al tomar medidas más efectivas para abordar el problema ambiental global a través de un esfuerzo universal en las unidades escolares” (Zafeiropoulos et al., 2021); donde la necesidad de conservar el patrimonio geológico es tan urgente como la necesidad de conservar la biodiversidad, la historia humana, las culturas y las tradiciones (Kaur, 2022).

No obstante, Manríquez et al. (2019) establecen que “los esfuerzos y acciones de algunas naciones para conservar la geodiversidad y el geopatrimonio son diversas y poseen diferentes grados de complejidad en estructuración y valoración, otras se encuentran en

una etapa incipiente y algunas aún necesitan despertar, por lo que, parte del geopatrimonio se ha perdido debido a la falta de conciencia o al desarrollo de actividades, tales como, la minería, la agricultura, el desarrollo urbano y las obras de infraestructura industrial”, motivo por el cual califican a la perspectiva geopatrimonial de América Latina.

En este contexto, la creación de nuevas figuras de geoconservación como es el caso de los geoparques, concibe como premisa la participación comunitaria en la ejecución de proyectos que vinculen las preferencias y necesidades locales en un mismo esquema de geoconservación.

Uno de los problemas más recurrentes en los territorios que cumplen con las características para ser propuestos como geoparques; se encuentra condicionado por diversos causales como la falta de educación, la inclusión de la sociedad en planes de desarrollo gubernamentales y el poco reconocimiento del valor patrimonial que reflejan las autoridades en los territorios (Sánchez et al., 2017; Anis et al., 2021; Masjhoer y Vitrianto, 2024), a los que se integran rencillas económicas y políticas, negligencia de los actores involucrados, falta de interés en general y desconfianza en quienes realizan la propuesta teórica y operativa, como en los casos de las grutas de Cacahuamilpa (Guerrero) y el Distrito Minero de Tlalpujahua y El Oro (Michoacán y Estado de México), en el territorio mexicano.

En contraposición, en el Geoparque de Santo Domingo de Yanhuitlán, en la Sierra Mixteca Alta de Oaxaca en México, la participación social de las comunidades representa uno de los mejores ejemplos de integración social y participación, donde los grupos originarios se integran en actividades de formación formal e informal, en la prestación de servicios; aun y a pesar de la existencia de algunas diferencias entre grupos o gobiernos.

Durante el año 1996 surgió el concepto de “Geoparque”, cuatro años después se creó la Red Europea de Geoparques y se declararon los primeros cuatro; en 2004, con apoyo de la UNESCO se fundó la Red Global de Geoparques con la inscripción de diecisiete geoparques europeos y ocho chinos. Estos territorios se convirtieron en una de las iniciativas de

geoconservación más desarrolladas del siglo XXI en Europa, esto generó una expansión a otros continentes como Asia y América Latina. Al respecto Sánchez (2019), Ibáñez y Brevik, (2022) refirieron que en la década de 1990 la conservación del geopatrimonio ganó mayor visibilidad gracias al trabajo de los geoparques.

De acuerdo con la Red Mundial de Geoparques, en la actualidad, 213 territorios ostentan la condición de Geoparque Mundial de la UNESCO (GGN, 2024) mientras que otros, se encuentran en fase de preparación, como es el caso de la Huasteca Potosina (San Luis Potosí) y de Múzquiz (Coahuila), en México.

Con el tiempo, las prácticas y políticas de geoconservación han evolucionado. En los inicios los esfuerzos se centraban en la preservación de sitios geológicos específicos; mientras que en la actualidad ha adoptado un enfoque más holístico, desde una perspectiva regional, que sistematiza las labores de identificación, valorización y conservación del patrimonio geológico (Palacio et al., 2016).

Este nuevo enfoque incluye la conservación integrada de los recursos de la geodiversidad y en interacción con los habitantes de las comunidades, donde se promueve el desarrollo territorial y la sostenibilidad. A pesar de ello, la situación no es igual en todas las regiones. En Europa y Asia se concentra la mayor cantidad de geoparques, mientras que para la región de América Latina el avance de iniciativas está menos desarrollada (Anougmar et al., 2024).

Por otra parte, un análisis bibliométrico reciente refleja que existe un desequilibrio temático en la geoconservación puesto que, algunos temas, como el geopatrimonio en espacios urbanos y el patrimonio de la minería, reciben más atención que el patrimonio histórico o el patrimonio cultural inmaterial, que son temas menos explorados que incorporan valor cultural agregado a los sitios de geopatrimonio (Pijet-Migo y Migón, 2022). Según Quesada-Valverde y Quesada-Román (2023) la geoconservación debería referirse también a la conservación intangible, representada tanto por textos como por contenidos multimedia, que las tecnologías actuales pueden crear y ofrecer.

Con referencia a las tendencias actuales de la geoconservación, avances tecnológicos y nuevas estrategias de conservación del patrimonio geológico, autores como Ibáñez y Brevik (2022), Pareja y Martínez, (2023) y Quesada y Quesada (2023), establecen que entre estrategias de geoconservación y geoturismo todavía predominan las investigaciones relacionadas con el inventario y evaluación del patrimonio geológico (Figura 3); en segundo lugar, la elaboración de la cartografía digital y el modelado 3D para la gestión y planificación del geopatrimonio, y de los geoparques, propuestos por la UNESCO, como escenario clave para promover el geoturismo y la geoconservación.

Al respecto, Crofts *et al.* (2020) reportaron que la disponibilidad de herramientas de mapeo y monitoreo han facilitado la identificación y gestión de sitios de geopatrimonio; lo que permite una evaluación más precisa y eficiente de los riesgos.

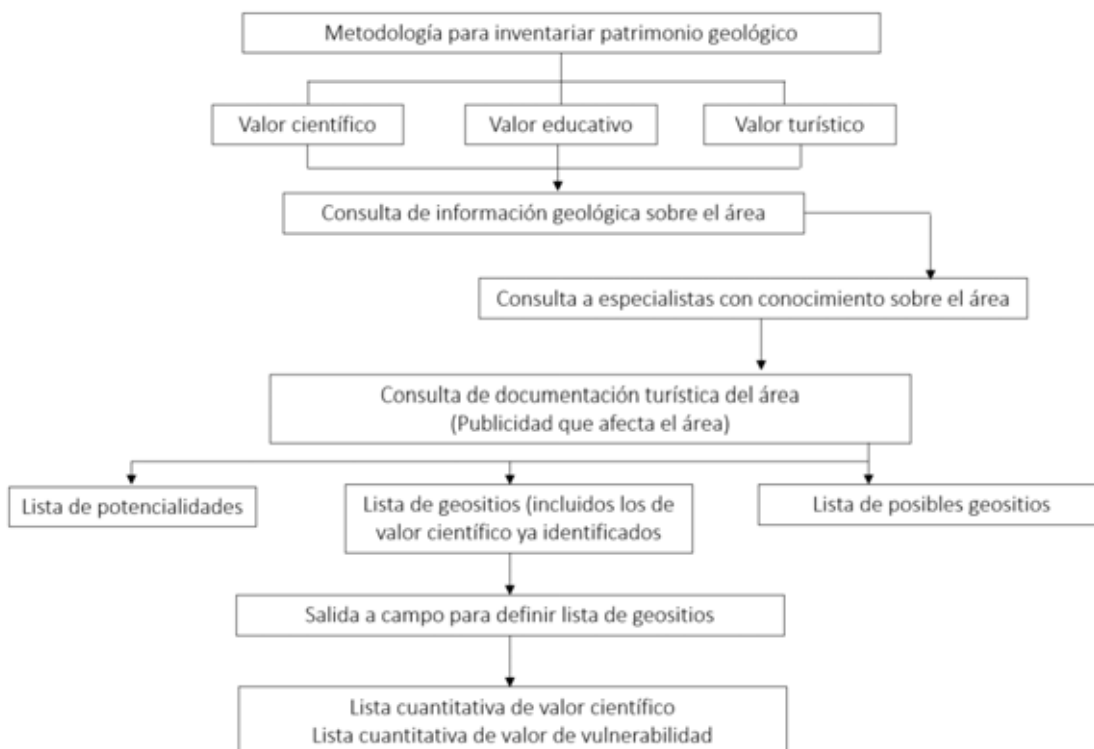


Figura 3. Ejemplo de metodología base para el inventario del patrimonio geológico.

Fuente: Modificado de Brilha (2018).

Se considera que las nuevas tecnologías abren ventanas de oportunidad para el geoturismo, esto logra que los visitantes puedan explorar y aprender sobre los sitios geológicos de manera más interactiva y educativa. De esta forma, se puede observar una tendencia neutral, lo que ha llevado a un incremento exponencial de las investigaciones en geoturismo y a un mayor enfoque en la creación de experiencias turísticas sostenibles y enriquecedoras, tal como lo destacan Pijet-Migo y Migón (2022) y Pareja y Martínez (2023).

El desarrollo de la cartografía ha sido el soporte fundamental del inventario de geositos, impulsado por la creación de los geoparques en todo el mundo, donde se ha podido promover la geodiversidad en diversas regiones del planeta. Se puede decir que como tendencia predomina el doble interés, conservacionista y el económico. El primero se manifiesta a través de la inclusión del patrimonio geológico en las legislaciones; mientras que el económico se desarrolla a través de actividades como el geoturismo Pareja y Martínez, (2023).

En cuanto a metodologías empleadas en los últimos años para la geoconservación, Brilha *et al.*, (2018) señalaron que persisten dos enfoques principales para evaluar la geodiversidad; el enfoque cualitativo y el cuantitativo. El enfoque cuantitativo busca expresar la variabilidad espacial, basada en parámetros e indicadores numéricos, el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el álgebra cartográfica, empleados para compilar los resultados de evaluaciones parciales de elementos de la geodiversidad en base funciones algebraicas y lógicas, mediante datos espaciales rasterizados o vectoriales (Brilha *et al.*, 2018).

El enfoque cualitativo, se centra en una evaluación más interpretativa y descriptiva de la geodiversidad, a partir de la valoración del patrimonio geológico, a través de estudios de campo, observaciones directas y juicios de expertos; en este método se resalta la calidad y la singularidad de los elementos geológicos, así como su relevancia científica, educativa y cultural. Sin embargo, Brilha *et al.* (2018) han señalado que la relación entre análisis cuantitativos y los valores del geopatrimonio (cualitativos) es aún limitada y que un enfoque

combinado podría proporcionar una visión más completa y equilibrada de la geodiversidad, al integrar la objetividad de los datos cuantitativos con la profundidad interpretativa del análisis cualitativo. Quesada-Valverde y Quesada-Román (2023) apoyaron la afirmación anterior al destacar que el valor potencial de un geosítio varía según las necesidades de las posibles partes interesadas; puesto que un aficionado, un turista o un académico no comparten el mismo interés por el mismo sitio.

De acuerdo con Ibáñez y Brevik (2022), otra tendencia importante es la integración de la geoconservación con objetivos de desarrollo sostenible. En tal sentido los geoparques, combinan territorio, geodiversidad y biodiversidad, al crear una conexión con la sostenibilidad (Herrera *et al.*, 2022) en estos espacios, no solo se promueve la conservación de sitios geológicos, sino también el desarrollo económico local y la educación ambiental.

En el marco de los Geoparques Globales de la UNESCO (UGG), se destaca la implementación de talleres comunitarios destinados a fortalecer los conceptos de geoturismo y geoconservación. Estos talleres abordan temas teóricos como la interpretación, la geoconservación, la geoeducación (García *et al.*, 2021). Abramowicz *et al.* (2022) refieren que en países como España las actividades educativas en los geoparques son variadas y están diseñadas para involucrar al público, en general, en la apreciación y conservación de la geodiversidad.

Otras tendencias actuales a destacar son la inclusión de los servicios geosistémicos en los estudios de geodiversidad, puesto que la mayoría de las estrategias de conservación tienden a pasar por alto el componente geológico dentro de los ecosistemas (Anougmar *et al.*, 2024). Los servicios de los geosistemas, también conocidos como servicios de los ecosistemas abióticos, abarcan los bienes y funciones derivados de la geodiversidad. Estos beneficios pueden ser tangibles (por ejemplo, carbón, petróleo) o intangibles (por ejemplo, los beneficios para la salud mental de experimentar un entorno natural virgen) (Brilha *et al.*, 2018).

4. Discusión

A lo largo de la historia, la geoconservación fue una disciplina secundaria dentro del ámbito de la conservación de la naturaleza (Crofts et al., 2020). Esta visión limitó la gestión de la geoconservación a nivel político y administrativo, lo que resultó en una falta de recursos y apoyo institucional para muchos proyectos tal y como sucede en Ecuador, donde parte del patrimonio geológico y varios geositos se administran bajo el esquema de áreas protegidas, en el que predomina la conservación de la diversidad biológica sobre cualquier otro componente (Sánchez-Cortez, 2019).

Uno de los desafíos clave para garantizar la conservación sostenible del geopatrimonio, es la gestión adecuada de los geositos, en especial desde el contexto del turismo; Quesada y Quesada (2023) alertaron sobre la necesidad de regulaciones adecuadas para evitar el deterioro de los geositos debido al turismo no controlado. La carencia de recursos financieros es otra de las amenazas que presenta esta actividad, sobre todo en países subdesarrollados, según refieren Anougmar et al. (2024). De manera particular en el continente americano se ha observado que la falta de legislación y normatividad dificulta la protección efectiva del patrimonio geológico. La ausencia de políticas nacionales e internacionales estandarizadas limita la protección y gestión de estos recursos, lo que puede llevar a su degradación y pérdida de la geodiversidad (Herrera-Franco et al., 2022).

Otro obstáculo destacado por los investigadores sobre los recursos geopatrimoniales y la geodiversidad, deviene en una distribución desigual del turismo, lo que genera exceso de visitantes y estrés ambiental en lugares populares, mientras que las áreas periféricas son menos visitadas (Migo y Pijet, 2024). Al respecto también se ha demostrado que el sesgo geográfico en la distribución de los geoparques de la UNESCO, concentrados en regiones con una economía turística significativa, limita la representatividad global de la geodiversidad, por lo que aún existen regiones del mundo donde los estudios de geopatrimonio son escasos, a pesar de existir formas de relieve, procesos y paisajes

increíbles (Ibáñez y Brevik, 2022). Quesada-Valverde y Quesada-Román (2023); Pareja y Martínez (2023) con elementos naturales de alto valor para la comunidad científica, el ámbito cultural y educativo.

Las estrategias turísticas deben adaptarse para promover sectores de geoparques con menos recursos (Anougmar et al., 2024). Por ello, se destaca la necesidad de equilibrar la protección del geopatrimonio con la seguridad de los visitantes y la integridad de los procesos geológicos (Crofts et al., 2020). La recopilación de datos sobre visitantes y su análisis estadístico puede mejorar la gestión de los geoparques (Canesin et al., 2020). Según lo define France (1997), el turismo comunitario es "un tipo de turismo dirigido por y para la comunidad local" (p. 2). En respuesta al desafío que imponen los visitantes foráneos, el turismo comunitario emerge como una forma de estimular la geoconservación y fortalecer las capacidades cognitivas de las comunidades (Sánchez-Cortez y Simbaña-Tasiguan, 2018).

La falta de clasificaciones universales y metodologías estandarizadas coherentes de litología y especialmente de geomorfología, dificulta comparar y contrastar las estimaciones de geodiversidad entre diferentes regiones, lo que impide una comprensión global completa de la geodiversidad mundial (Ibáñez y Brevik, 2022); Abramowicz et al. (2022) por su parte sostienen que la geodiversidad no se aborda de manera sistémica en los currículos básicos, lo que representa una barrera adicional para su comprensión y valorización. Lo anterior demanda mayores esfuerzos para alcanzar una verdadera prospección de la geodiversidad a nivel global y la presentación de propuestas en América Latina.

Con respecto a lo anterior Palacio et al., (2016), se enfoca en conocer el estado que guarda el tema de patrimonio geológico desde una perspectiva nacional; temas, prioridades, perspectivas, y el establecimiento de comunicación con especialistas interesados en la materia, que sirva de interlocutor con otras iniciativas de alcance regional y mundial.

En su obra compila una descripción genérica de su geología, de los elementos patrimoniales y de las estrategias puestas en marcha para la conservación de dicho patrimonio. Aporta metodologías sobre los criterios y lineamientos específicos para identificar y levantar el inventario del patrimonio geológico nacional. Y no menos relevante su contribución a la discusión del concepto de “patrimonio geológico” y “geoconservación” en la búsqueda de establecer conceptos unificados para la región.

En la nueva concepción de la geoconservación, se busca expandir su enfoque más allá de la temática geológica y/o geomorfológica, hacia una estrategia más orientada al desarrollo sostenible que responda a los intereses de las localidades (de abajo hacia arriba); de forma tal, que los geoparques sean espacios donde las comunidades y sus habitantes jueguen un papel central, al integrar la relación de los individuos y sus actividades económicas con la geodiversidad presente en su territorio. Este principio permitirá que las dinámicas sociales sean parte de los rasgos evolutivos del planeta. Este enfoque no solo enriquece la geoconservación, sino que también fortalece el tejido social y cultural de las comunidades y sus gestores clave.

El estudio prospectivo de la vulnerabilidad del patrimonio geológico ante fenómenos naturales y actividades humanas es esencial para su preservación; en esta dirección, la implementación de una estrategia de gestión integral que abarque el monitoreo constante, capacitación, la investigación y divulgación de los resultados es fundamental.

Proyectar un enfoque que integre educación e iniciativas de desarrollo endógeno en regiones como América Latina puede transformar los geoparques en motores de desarrollo sostenible, donde se fortalezca el compromiso comunitario con la conservación y el uso responsable de su patrimonio natural. La colaboración activa entre gobiernos, líderes comunitarios y científicos puede devenir en modelos de gestión cada vez más robustos, sostenibles y eficientes. Ejemplos exitosos como el Geoparque de Araripe, en Brasil, o el de la Mixteca Alta, en Oaxaca, han demostrado que esta sinergia no solo protege el patrimonio

abiótico, sino que también fomenta una cultura de prevención y resiliencia ante desastres naturales.

5. Conclusiones

La investigación permitió analizar los fundamentos teórico-metodológicos de la geoconservación, así como, las principales tendencias y desafíos que enfrenta esta disciplina a escala global. El análisis de artículos del año 2000 a la fecha refleja la evolución histórica de la geoconservación y las principales referentes teórico-conceptuales que han sido tendencia desde los primeros registros de conservación del patrimonio geológico, desde la creación de redes temáticas internacionales, como la Red Global de Geoparques hasta, la aparición de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) en México, creada en 2000, encargado de la administración de las áreas naturales protegidas a través de las cuales se promueve la conservación de los ecosistemas, los paisajes y la biodiversidad.

A pesar del notable avance en la identificación de geositos y el aprovechamiento de sus potencialidades para el desarrollo sostenible de los territorios, los resultados varían a escala regional. En varios países de la región euroasiática, se observa una consolidación en el inventario de geositos y geomorfositos, así como en actividades resultantes como el geoturismo y su vinculación con el patrimonio y cultural. Como producto de estos avances, 77 territorios ostentan la condición de Geoparques Mundiales de la UNESCO, en Europa (GGN, 2024), lo que representa más del 40 % a escala global. Sin embargo, en otras regiones como América Latina los resultados son más discretos o incipientes como en el caso de África.

La creación de la Red Europea de Geoparques ha permitido establecer un amplio marco legal en esa área geográfica, sin embargo, en otros territorios las políticas gubernamentales aún se enfocan en la protección de la biodiversidad y términos como patrimonio geológico y geodiversidad no aparecen de manera explícita en las políticas y legislaciones estatales.

A pesar de las limitaciones de la metodología utilizada y los riesgos de sesgo de información producto de los criterios de inclusión y exclusión de artículos científicos, la investigación pone de manifiesto que se cree una conciencia en los gobiernos y las comunidades de la necesidad de la conservación del patrimonio geológico, se requiere de un enfoque holístico que considere no solo la preservación de sitios geológicos sino también su relación con la biodiversidad y las actividades socioeconómicas, culturales y ecoturísticas locales.

En el futuro, los estudios de geodiversidad deben incluir regiones menos analizadas, mediante redes de colaboración, puesto que una gran cantidad de geositos de interés científico constituyen geoparques potenciales que aún son invisibles para el público nacional e internacional; lo que deviene en un gran desafío para la investigación y geoeducación. En la actualidad, persiste la necesidad de abordar estos desafíos de la geoconservación en los colectivos académicos y científicos de los países de América Latina, esto permitirá realizar análisis estratégicos multidisciplinarios que contribuyan a una mejor gestión territorial y adaptada al diagnóstico de cada localidad; con la finalidad de promover una gestión integral del patrimonio geológico y realizar nuevas propuestas de geoparques.

Por último, y para el caso particular de México, se debe agregar que uno de los problemas clave a los que se enfrentan las declaratorias de geoparques, es la carencia de disposiciones y regulaciones de orden jurídico, que converjan dimensiones ambientales, culturales, históricas, culturales, económicas y estéticas en un territorio; en donde si bien se valoran aspectos como la generación de conciencia social del patrimonio construida de abajo hacia arriba desde una perspectiva participativa e inclusiva como solo pasa en la Mixteca Alta, los enfoques de desarrollo, geoturismo, turismo alternativo, desarrollo sustentable y sostenible; aún falta fortalecer aspectos relacionados con proyectos específicos de educación, fortalecimiento y potencialización de aspectos culturales como la historia y la conformación de conciencias críticas sobre la naturaleza y los recursos in situ, cosmogonía, etc.; así como de los tejidos sociales, formas tradicionales de vida diaria que consideran sitios de habitación, de vestido y de gastronomía entre otros, y en mayor escala el

fortalecimiento de procesos relacionados con la autogestión y la unión comunitaria, que lleve a la sustentabilidad o sostenibilidad del aprovechamiento de los geoparques.

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

6. Referencias

Abramowicz, D., Dóniz-Páez, J., Tritt, R., Bąk, M. (2022). Methodological framework for geodiversity application in geographic education from a case study of Canary Islands, Spain. *Quaestiones Geographicae*, 41(1): 79-91. <https://sciendo.com/pdf/10.2478/quageo-2022-0006>.

Anis, A., Azhar, Z., Putra, H. S., Juneldi, J. (2021). Tourist Participation: Causality of Tourism Object Development and Promotion of Geopark Silokek Tourism at Sijunjung Regency. In *Sixth Padang International Conference on Economics Education, Economics, Business and Management, Accounting and Entrepreneurship (PICEEBA 2020)* (pp. 163-168). Atlantis Press.

Anougmar S, Meesters A, van Ree D, Compennolle T. 2024 The dilemma of valuing geodiversity: geoconservation versus geotourism. *Phil. Trans. R. Soc. A*. 382: 20230049. DOI: 10.1098/rsta.2023.0049.

Burek C. y Potter J. (2002). Local Geodiversity Action Plans. Setting the context for geological conservation. *English Nature*. Peterborough, Inglaterra. 64 pp.

Bratton, A., Smith, B., McKinley, J., and Lilley, K. (2013). Expanding the geoconservation. *Toobox: Integrated hazard management at dynamic geoheritage sites*. Springer. 5(3): 173-183.

Brilha J (2002) Geoconservation and protected areas. *Environ Conserv* 29 (3):273–276. DOI:10.1017/S0376892902000188.

Brilha, J. (2005). Património geológico e geoconservação. A conservação de natureza na sua vertente geológica. Lisboa: Palimago. 183 pp.

Brilha, J. (2013). Nuevas perspectivas del patrimonio geológico y los geoparques. Conferencia de clausura de la X Reunión Nacional de la Comisión del Patrimonio Geológico, Sociedad Geológica de España, Segovia. 10(1): 1-9.

Brilha, J. (2016). Inventario y evaluación cuantitativa de geosítios y sitios de geodiversidad: una revisión del patrimonio geológico, *Geoheritage*. 8(2): 119-134.

Brilha, J., Gray, M., Pereira, D. I., & Pereira, P. (2018). Geodiversity: An integrative review as a contribution to the sustainable management of the whole of nature. *Environmental Science & Policy*, 86: 19-28. DOI: 10.1016/j.envsci.2018.05.001.

Bruschi, M. (2007). Desarrollo de una metodología para la caracterización, evaluación y gestión de los recursos de la geodiversidad. León: Universidad de Cantabria. 355 pp.

Bruschi, M. and Cendrero, A. (2007). Geosite evaluation; can we measure intangible values? *Il Quaternario, Italian Journal of Quaternary Sciences*. 18(1): 293-306.

Bruschi, M., Cendrero, A., and Cuesta, J. (2011): A statistical approach to the validation and optimisation of geoheritage assessment procedures. *Springer*. 3(33): 131-149.

Burek, C. (2012). The role of LGAPs (Local Geodiversity Action Plans) and Welsh RIGS as local drivers for geoconservation within geotourism in Wales. *Springer*. 4(1-2): 45-63.

Canesin, T.S., Brilha, J. & Díaz-Martínez, E. (2020). Best Practices and Constraints in Geopark Management: Comparative Analysis of Two Spanish UNESCO Global Geoparks. *Geoheritage* 12, 14 (2020). DOI: 10.1007/s12371-020-00435-w.

Carcavilla, L. (2006). Patrimonio geológico y geodiversidad: investigación, conservación, gestión y relación con los espacios naturales protegidos. Tesis doctoral inédita leída en la Universidad Autónoma de Madrid, Facultad de Ciencias, Departamento de Química

Agrícola, Geología y Geoquímica. Fecha de lectura: 23-03-2006.
<https://repositorio.uam.es/handle/10486/66371163711>

Carcavilla, L. (2007). La divulgación de la geología en espacios protegidos: las geo-rutas del Parque Natural del Alto Tajo (Guadalajara). *Revista de la Asociación Española para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 15 (1), 65-76.

Carcavilla, L., Durán, Juan J and J. J. G.-T. López-Martínez (2007). "Geodiversidad: concepto y relación con el patrimonio geológico." 10(2008): 1299-1303.
https://web.igme.es/patrimonio/descargas/concepto_Geodiversidad.pdf

Carcavilla, L. y García, A. (2010). Geoparques, significado y funcionamiento. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España. Ministerio de Economía y Competitividad. 7 pp.

Carcavilla, L., Belmonte, A., Durán, J. e Hilario, A. (2011). Geoturismo: concepto y perspectivas en España. *Enseñanza de Ciencias de la Tierra. Revista de la Asociación Española para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*. 19(1): 81-94.

Carcavilla, L., Delvene, G., Díaz, E., García, A., Lozano, G., Rábano, I. y Vegas, J. (2012). Geodiversidad y patrimonio geológico. Instituto Geológico y Minero de España. [En línea]. Disponible en: <http://www.igme.es/internet/patrimonio>. Fecha de consulta: 7 de octubre de 2024.

Carcavilla, L. Durán, J, Vázquez, A. y Vázquez, J. (2014). Patrimonio geomorfológico: conservación y gestión de los edificios y paisajes tobáceos. Las Tobas en España. *Sociedad Española de Geomorfología*. 1(448): 339-348.

Cortés, G., Baretton, D., and Gallego, E. (2000). Inventory and cataloguing of Spain's geological heritage. An historical review and proposals for the future. *Geological heritage: It's conservation and management. Spain*. 1(1): 47-67.

Corvea, J., Blanco, A., Bustamante, I., Farfán, H., Martínez, Y., Novo, R., and López, N. (2014): Advances in Geoconservation in Cuba: Assessment of the Guaniguanico Range and Guanahacabibes Plain (Pinar del Río). Springer. 1(1): 1-16.

Crofts, R., Gordon, J. E., & Santucci, V. L. (2019). Geoconservación en áreas protegidas. Gobernanza y gestión de áreas protegidas. Editorial Universidad El Bosque y ANU Press, Bogotá, 565-606.

Crofts, R., Gordon, J. E., Brilha, J. B., Gray, M., Gunn, J., Larwood, J., Worboys, G. L. (2020). Guidelines for geoconservation in protected and conserved areas. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/PAG-031-En.pdf>

Digne Declaration, D.D. (1991). Declaration of the Rights of the Memory of the Earth. English translation used by ProGEO. <http://www.sgu.se/hotell/progeo/digne.html>.

Da Glória Garcia, M., Queiroz, D. S., & Mucivuna, V. C. (2022). Geological diversity fostering actions in geoconservation: An overview of Brazil. International Journal of Geoheritage and Parks, 10(4), 507-522. DOI: 10.1016/j.ijgeop.2022.08.008.

Díaz-Martínez, E., García-Cortés, A., Carcavilla Urquí, L. (2013). Los fósiles son elementos geológicos y el patrimonio paleontológico es un tipo de patrimonio natural; en Vegas, J., Salazar, A., DíazMartínez, E., Marchán, C. (ed.), Patrimonio geológico, un recurso para el desarrollo: Cuadernos del Museo Geominero, nº 15, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 583–589. DOI:10.13140/2.1.4825.2484.

Dingwall, R. (2000). Legislación y convenios internacionales: la integración del patrimonio geológico en las políticas de conservación del medio natural. Patrimonio geológico: conservación y gestión. ITGME, Madrid. 1(1): 15-29.

Dixón, G. (1996). Geoconservation an International Review and Strategy for Tasmania. A report to the Australian Heritage Comission. Ocasional Paper No. 35, Parks y Wildlife Management, Tasmania, 1991.

Durán, V. Juan, J. (1998). Patrimonio Geológico de la Comunidad Autónoma de Madrid. Sociedad Geológica de España, Madrid, 290 pp. ISBN: 978-84-605-7863-5

Eder, W. (1999). UNESCO Geoparks: a new initiative for protection and sustainable development of Earth's heritage. Neues Jahrbuch Fur Geologie Und Palaontologie-Abhandlungen. 214(1-2): 353-358.

Fernández, J. (2007). Identificación y evaluación de geositos en el Parque Nacional Torres del Paine. Memoria de Título, departamento de Geología de la Universidad de Chile. 1(1): 77.

Flawn, P.T. (1970). Environmental geology: Conservation, land-use planning, and resource management. Harper's Geoscience Series, Nueva York.
https://archive.org/details/environmentalgeo0000pete_e5h3/page/n5/mode/2up

France, L. (1997) Sustainable Tourism. Earthscan Publications, London, UK.

Fuming, L., Fang, W., Heigang, X., Zhaoguo, W., and Baofo, L. (2015). A study on classification and zoning of Chinese geoheritage resources in national Geoparks. Geoheritage Digital Journal. 1(9): 1-15.

García-Sánchez, L., Canet, C., Cruz-Pérez, M. Á., Morelos-Rodríguez, L., Salgado-Martínez, E., & Corona-Chávez, P. (2021). A comparison between local sustainable development strategies based on the geoheritage of two post-mining areas of Central Mexico. International Journal of Geoheritage and Parks, 9(4), 391-404. DOI: 10.1016/j.ijgeop.2021.10.001.

Gonggrijp, G.P. (2000). Patrimonio Geológico: Conservación y Gestión. En D. Barettino, W. A. P. Wimbledon y E. Gallego (eds.) pp 31-49. Madrid (Spain), 2000.

Global Geoparks Network (GGN). (2023). Celebrating the Earth heritage: Sustaining local communities. Retrieved from <https://globalgeoparksnetwork.org/>.

Gray, M., Gordon, J. E, Brown, E. J. (2013) Geodiversity and the ecosystem approach: The contribution of geoscience in delivering integrated environmental management. *Proc Geol Assoc* 124(4):659–673.

Grube A (1994) The national park system in Germany. In: O'Halloran D, Green C, Harley M, Stanley M, Knill J (eds) *Geological and Landscape Conservation*. The Geological Society, London, pp 175–180

Herrera-Franco, G., Carrión-Mero, P., Montalván-Burbano, N., Caicedo-Potosí, J., & Berrezueta, E. (2022). Geoheritage and geosites: A bibliometric analysis and literature review. *Geosciences*, 12(4), 169. <https://www.mdpi.com/2076-3263/12/4/169/pdf>

Ibáñez, J. J., & Brevik, E. C. (2022). Geodiversity research at the crossroads: two sides of the same coin. *Spanish Journal of Soil Science*, 12, 10456. DOI: 10.3389/sjss.2022.10456.

Johansson, C.E., Andersen, S. y Alapassi, M. (1999). Geodiversity in the Nordic Countries. *ProGeo. News*, 1, 1-3. http://www.progeo.ngo/downloads/progeo_news_1999_1.pdf.

Kaur, G. (2022). Geodiversity, geoheritage and geoconservation: a global perspective. *Journal of the Geological Society of India*, 98(9), 1221-1228. DOI: 10.1007/s12594-022-2156-1.

Kozłowski, S. (2004). Geodiversity. The concept & scope of geodiversity. *Polish Geological Review*, (52), 833-837.

ProGEO, 2011. *Conserving our Shared Geoheritage – A Protocol on Geoconservation Principles, Sustainable Site Use, Management, Fieldwork, Fossil and Mineral Collecting*. 10 pp. <http://www.progeo.se/progeo-protocol-definitions-20110915.pdf> (Consultado: 2024).

Manríquez Tirado, H., Mansilla Quiñones, P., & Moreira Muñoz, A. (2019). Hacia una conservación integrada del paisaje biogeocultural de Atacama. *Diálogo andino*, (60), 141-152. <https://www.scielo.cl/pdf/rda/n60/0719-2681-rda-60-141.pdf>

Martínez, P. (2007). Identificación, caracterización y cuantificación de geositos para la creación de un geoparque en Chile. Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Repositorio Universidad de Chile. 1(1): 173.

Masjhoer, J. M., Vitrianto, P. N. (2024). Community engagement in waste reduction: A critical component for Gunung Sewu Geopark conservation, Yogyakarta, Indonesia. *Environmental & Socio-economic Studies*, 12(2), 1-12. DOI: 10.2478/environ-2024-0008.

Migón, P.; Pijet-Migón, E. (2024). Non-Uniform Distribution of Geoheritage Resources in Geoparks—Problems, Challenges and Opportunities. *Resources* 2024, 13, 23. DOI: 10.3390/resources13020023.

O' Halloran D, Green C, Harley M, Stanley M, Knill J (eds) (1994). *Geological and Landscape Conservation*. The Geological Society, London.

Palacio Prieto, J. L. (coord.), Sánchez Cortez, J. L. y Schilling, M. E. (Eds.) (2016). *Patrimonio geológico y su conservación en América Latina. Situación y perspectivas nacionales*. Colección: Geografía para el Siglo XXI. Libros de Investigación 18 Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, 265 pp. ISBN: 978-607-02-8374-1

Pages, M. J., Moher, D., McKenzie, J. E. (2022). Introduction to PRISMA 2020 and implications for research synthesis methodologists. *Research synthesis methods*, 13(2), 156-163. DOI: 10.1002/jrsm.1535.

Pareja, G. & Martínez-Ibarra, E. (2023). Revisión bibliográfica internacional sobre el patrimonio geológico. *Investigaciones Geográficas*, (79), 67-86. DOI: 10.14198/INGEO.22558.

Pijet-Migón, E.; Migón, P. Geoheritage and Cultural Heritage—A Review of Recurrent and Interlinked Themes. *Geosciences* 2022, 12, 98. DOI: 10.3390/geosciences12020098.

Quesada E., y Quesada A. (2023). Worldwide trends in methods and resources promoting geoconservation, geotourism, and geoheritage. *Geosciences*, 13(2), 39. <https://www.mdpi.com/2076-3263/13/2/39/pdf>.

Salazar, A., Carcavilla, L., and Diéz-Herrero, A. (2014). Geomorphological heritage and conservation in Spain. In F. Gutiérrez and M. Gutiérrez (Eds.), *Landscapes and landforms of Spain* (pp. 307-318). Madrid: Springer, Netherlands.

Sánchez-Cortez, J. L., Arredondo-García, M. C., Leyva-Aguilera, C., Ávila-Serrano, G., Figueroa-Beltrán, C. y Mata-Perelló, J. M. (2017). Participación comunitaria y percepción social en Latinoamérica: un futuro para las áreas protegidas y proyectos de geoparques. *Ambiente y Desarrollo*. 21(41), 61-77. DOI: 10.11144/Javeriana.ayd21-41.pcps

Sánchez-Cortez, J. L., & Simbaña-Tasiguan, M. (2018). Los geoparques y su implantación en América Latina. *Estudios Geográficos*, 79(285), 445–467. DOI: 10.3989/estgeogr.201817.

Sánchez-Cortez, J. L. (2019). Conservation of geoheritage in Ecuador: Situation and perspectives. *International Journal of Geoheritage and Parks*, 7(2), 91-101. DOI: 10.1016/j.ijgeop.2019.06.002.

Sánchez, S., Pedraza, I. P., Donoso, M. D. (2022). ¿Cómo hacer una revisión sistemática siguiendo el protocolo PRISMA?: Usos y estrategias fundamentales para su aplicación en el ámbito educativo a través de un caso práctico. *Bordón: Revista de pedagogía*, 74(3), 51-66. DOI: 10.13042/Bordon.2022.95090.

Semeniuk, V.; Brocx, M. (2008). Geoheritage and geoconservation – history, definition, scope and scale. *Journal of the Royal Society of Western Australia*, 90, 53-87.

Serrano, E. y Ruiz-Flaño, P. (2007): Geodiversidad: Concepto, evaluación y aplicación territorial. el caso de Tiermes Caracena (Soria), *Boletín de la AGE*, 45:79-98.

Stanley, M. (2000). Geodiversity. *Earth Heritage*, 14: 15-18. <https://www.earthheritage.org.uk/wp/wp-content/uploads/2018/03/EH14-2000.pdf>.

- Strasser, A. Heitzmann, P. Jordan, P. Stapfer, A. Stürm, B. Vogel, A. Weidmann, M. (1995). Geotope und der Schutz erdwissenschaftlicher Objekte in der Schweiz: ein Strategiebericht. Arbeitsgruppe Geotopschutz Schweiz. Fribourg, im März 1995. https://portal-cdn.scnat.ch/asset/4927e252-32b1-58d0-b61e-da5233c11511/Geotope_Strateg_Bericht_1995_D.pdf?b=020a4f7c-dc97-559b-8f01-945a01815796&v=66f936cd-ed0-5990-a29d-
- UICN. (2023). La geología sustenta la biodiversidad. <https://iucn.org/es/articulo/202307/la-geologia-sustenta-la-biodiversidad>. [2024].
- Zafeiropoulos, G.; Drinia, H.; Antonarakou, A. Zouros, N. (2021). From Geoheritage to Geoeducation, Geoethics and Geotourism: A Critical Evaluation of the Greek Region. *Geosciences*, 11, 381. DOI: 10.3390/geosciences11090381.
- Zouros, N. (2004). The European Geoparks Network: Geological heritage protection and local development. *Episodes*. 27(3): 165-171. DOI: 10.18814/epiugs/2004/v27i3/002.

La población con discapacidad en el estado de Guerrero, México: un acercamiento desde la óptica de la vulnerabilidad y la exclusión social

The population with disabilities in the state of Guerrero, Mexico: an approach from the perspective of vulnerability and social exclusion

Neftalí García Castro ^{1*}, Yuridia Lozano Peñaloza ²

¹ Centro de Investigación y Posgrado en Estudios Socioterritoriales de la Universidad Autónoma de Guerrero, Calle 16 de septiembre, número 42, Barrio de San Mateo, C.P. 39022, Chilpancingo de los Bravo, Guerrero, neftaligarcia@uagro.mx, <https://orcid.org/0000-0001-5144-4224>

² Escuela Superior de Ciencias Económicas de la Universidad Autónoma de Guerrero. Correo. Av. Lázaro Cárdenas S/n C.u. Sur., 39090 Chilpancingo, Guerrero, loz.uagro1@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5608-562X>

*Autor de correspondencia

Recibido: 04/12/2024. Aceptado: 02/01/2025. Publicado: 21/01/2025.

Cómo citar: García Castro, N., & Lozano Peñaloza, Y. (2025). La población con discapacidad en el estado de Guerrero, México: un acercamiento desde la óptica de la vulnerabilidad y la exclusión social. *Geografía Aplicada*, 1(1), 168-196. Consultado de <https://geografiaaplicada.uaemex.mx/article/view/25632>

Resumen

El presente artículo tuvo como propósito identificar las diferencias territoriales relacionadas con la distribución de la población con discapacidad (PCD) en los ochenta y un municipios del estado de Guerrero. Con tal finalidad, se realizó una revisión sucinta de la literatura especializada en materia de discapacidad-vulnerabilidad-exclusión social y se analizó la información publicada por el Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI), en el Censo de Población y Vivienda 2020. El examen de los tabulados censales dio pauta para confeccionar una serie de matrices y cartografía temática, las cuales revelaron que la presencia de una cantidad significativa de PCD demanda la elaboración de políticas públicas *ad hoc*; en especial, aquellas relacionadas con el acceso a los servicios de salud. En el estado de Guerrero hay 669 526 PCD, 24.5% de éstas no están afiliadas a ningún servicio de salud. A nivel municipal esta problemática social es patente en demarcaciones de las regiones Norte y Tierra Caliente; en particular: Cutzamala de Pinzón (53.72%), Pungarabato (47.27%), General Canuto A. Neri (46.82%), Tlapehuala (45.61%) y Cuetzala del Progreso (44.18%).

Palabras clave: Discapacidad, Exclusión social, Servicios de salud, Vulnerabilidad.

Abstract

The purpose of this article is to identify the territorial differences related to the distribution of the population with disabilities (PWD) in the eighty-one municipalities of the state of Guerrero. For this purpose, a succinct review of the specialized literature on disability-vulnerability-social exclusion was carried out. The information published by the National Institute of Geography and Statistics (INEGI) in the 2020 Population and Housing Census was analyzed. Examination of the census tabulations provided guidelines for creating a series of matrices and thematic cartography, which revealed that the presence of a

significant number of PWD demands the development of ad hoc public policies, especially those related to access to health services. In the state of Guerrero, there are 669,526 PWD, of whom 24.5% are not affiliated with any health service. At the municipal level, this social problem is evident in the demarcations of the North and Tierra Caliente regions, particularly in Cutzamala de Pinzón (53.72%), Pungarabato (47.27%), General Canuto A. Neri (46.82%), Tlapehuala (45.61%), and Cuetzala del Progreso (44.18%).

Keywords: Disability, Health services, Social exclusion, Social vulnerability.

1. Introducción

La población con discapacidad (PCD) ha sido abordada en numerosas investigaciones emergidas en el seno de las Ciencias Sociales. No obstante, el estudio de este sector demográfico, desde la óptica de la vulnerabilidad y la exclusión social que suele presentar este grupo personas, no es tan frecuente o por lo menos no tanto como una problemática social de su tipo demanda para la elaboración de políticas públicas *ad hoc*. El análisis de la PCD resulta relevante debido a su crecimiento notable ocurrido en decenios recientes como resultado del envejecimiento de la población mexicana y la prevalencia de ciertas enfermedades no transmisibles que discapacitan a las personas desde edades tempranas. En el plano nacional, algunas investigaciones sobresalientes son: 1) Discapacidad: entre la vulnerabilidad, discriminación y justicia social, un aporte de Peña (2008), 2) Las personas discapacitadas como grupo vulnerable a la luz de la Constitución mexicana, escrito por Flores (2010), 3) La discapacidad en México desde la vulnerabilidad social, de la autoría de Vite (2012), 4) Envejecimiento demográfico, discapacidad y vulnerabilidad social en Guanajuato, México, de Vega, Moreno y Carrillo (2016) y 5) Vulnerabilidad de las personas con discapacidad en México, un estudio de Jiménez y Ruiz (2018).

En el estado de Guerrero, el estudio de la triada: discapacidad-vulnerabilidad social-exclusión social puede concebirse, prácticamente, como un territorio ignoto. Con base en una búsqueda realizada en el Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma de

Guerrero (RIUAGRO), es posible sugerir que, en esta entidad mexicana, el tema de la PCD ha sido escasamente trabajado por especialistas de distintas disciplinas; entre las contadas excepciones podemos mencionar las investigaciones siguientes: 1) La discriminación como fenómeno bidireccional. Un estudio exploratorio sobre grupos vulnerables en Acapulco (Triana y Donoso, 2016), 2) Enseñanza de estocásticos a niños con discapacidad. Un acercamiento epistemológico (López y Navarro, 2019) y 3) Comprensión de la ecuación lineal de estudiantes con discapacidad intelectual del segundo grado de secundaria (Miranda, 2019). De esta manera, el propósito de la presente investigación fue identificar las diferencias territoriales relacionadas con la distribución de la PCD en los ochenta y un municipios del estado de Guerrero.

2. Metodología

Este artículo tuvo un carácter exploratorio sustentado en dos etapas: 1) la revisión de la literatura especializada y 2) la consulta y análisis de información estadística relacionada con el tema de discapacidad, registrada en el Censo de Población y Vivienda 2020 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)¹. La primera etapa dio pauta para esbozar un marco conceptual que buscó esclarecer la relación que existe entre: discapacidad, vulnerabilidad y exclusión social, lo que a la postre facilitó interpretar, desde una perspectiva territorial, cada uno de los *ítems* censales que miden la discapacidad², la limitación según el tipo de actividad cotidiana que realiza la población (Tabla 1) o bien algún problema o condición mental. En la presente investigación se retomaron los *ítems* asociados con las dificultades para realizar las actividades siguientes: 1) ver aun usando lentes, 2) oír aun usando aparato auditivo, 3) caminar, subir o bajar escaleras, 4) recordar o concentrarse,

¹ Se retomaron los lineamientos de Carrera et al. (1998), en torno al tratamiento estadístico y gráfico de la información en trabajos prácticos de geografía humana, así como los aportes de Propin (2003), al respecto.

² El INEGI define a las personas con discapacidad como aquellas que presentan dificultad para realizar actividades elementales como: ver, escuchar, caminar, recordar o concentrarse, realizar su cuidado personal y comunicarse.

5) bañarse, vestirse o comer, 6) hablar o comunicarse y 7) población con algún problema o condición mental.

Tabla 1. Tipos de actividades realizadas con dificultad.

Actividad	Definición
Caminar, subir o bajar	Hace referencia a la dificultad de una persona para moverse, caminar, desplazarse o subir escaleras debido a la falta de toda o una parte de sus piernas; incluye también a quienes teniendo sus piernas no tienen movimiento o presentan restricciones para moverse, de tal forma que necesitan ayuda de otras personas, silla de ruedas u otro aparato, como andadera o pierna artificial.
Ver	Abarca la pérdida total de la vista en uno o ambos ojos, así como a los débiles visuales y a los que aun usando lentes no pueden ver bien por lo avanzado de sus problemas visuales.
Oír	Incluye a las personas que no pueden oír, así como aquellas que presentan dificultad para escuchar (debilidad auditiva), en uno o ambos oídos, a las que aun usando aparato auditivo tiene dificultad para escuchar debido a lo avanzado de su problema.
Hablar o comunicarse	Hace referencia a los problemas para comunicarse con los demás, debido a limitaciones para hablar o porque no pueden platicar o conversar de forma comprensible.
Recordar o concentrarse	Incluye las limitaciones o dificultades para aprender una nueva tarea o para poner atención por determinado tiempo, así como limitaciones para recordar información o actividades que se deben realizar en la vida cotidiana.
Dificultad para bañarse, vestirse o comer	Son los problemas que tiene una persona para desarrollar tareas del cuidado personal o cuidar su salud.

Fuente: INEGI (2020).

En la segunda etapa se analizaron esos siete *ítems* previamente mencionados, se puso especial atención en la proporción que representa cada grupo de personas con un tipo de discapacidad específica o con algún problema o condición mental respecto al total de habitantes de la demarcación analizada, esto con la finalidad de conocer la importancia demográfica que tienen en cada uno de los 81 municipios del Guerrero. Asimismo, se evaluó la proporción de PCD sin afiliación a algún tipo de servicio de salud³ ya que esta

³ “El estado de salud de las personas con discapacidad suele ser peor que el de la población general. Hasta hace relativamente poco, a menudo se consideraba que esas diferencias eran una consecuencia inevitable de la discapacidad. Sin embargo, se reconoce cada vez más que, en realidad, podrían deberse a las desigualdades y disparidades existentes en el acceso a la atención sanitaria.” (Naciones Unidas, s/f, p. 13).

característica socioeconómica es un síntoma de las condiciones de vulnerabilidad y exclusión social en que vive este sector de la población. Los resultados de la consulta y análisis de información estadística se presentaron mediante una serie de matrices y cartografía temática que permiten la visualización de la distribución territorial de estas características. Cabe destacar que los hallazgos sugieren la necesidad de emprender indagaciones futuras en las que se profundice en el tema de la discapacidad-vulnerabilidad-exclusión social con un enfoque territorial más detallado, lo cual requerirá metodologías cualitativas que permitan interactuar directamente con la PCD. Además, esta investigación proporciona una base inicial para identificar a las unidades territoriales donde la discapacidad podría representar un problema de salud emergente en el estado de Guerrero.

3. Resultados

Con base en las etapas descritas en la sección anterior se presentan los hallazgos que a continuación se describen.

3.1 Discapacidad-vulnerabilidad social-exclusión social

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) define a la discapacidad como toda limitación o dificultad para llevar a cabo una actividad dentro de los parámetros que se consideran habituales para las personas. De manera más específica, la Organización Panamericana de la Salud (OPS), señala que las personas con discapacidad son aquellas que tienen limitaciones físicas, mentales, intelectuales o sensoriales de carácter permanente, las cuales, en conjunto con los obstáculos de tipo socioeconómico, dan pauta para dificultar su participación plena y efectiva en la sociedad en igualdad de condiciones con los demás.

En ese orden de ideas, la PCD⁴ suele estar con bastante frecuencia en situación de vulnerabilidad y, en lo sucesivo, exclusión social. La primera categoría alude a “...una

⁴ La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) señala que la población con discapacidad está considerada dentro del grupo de personas en situación de vulnerabilidad: 1) niños, niñas y adolescentes, 2) personas

condición social de riesgo, de dificultad, que inhabilita, de manera inmediata o en el futuro, a los grupos afectados, en la satisfacción de su bienestar -en tanto subsistencia y calidad de vida- en contextos socio históricos y culturalmente determinados...” (Perona y Rocchi, 2016, p. 1). En el esquema planteado por Castel (1995) identifica tres elementos concéntricos: un núcleo o zona concebida como integración ⁵, una franja adyacente denominada vulnerabilidad en la cual están aquellas personas con privaciones en algunos niveles de integración social, y una tercera franja conocida como marginalidad o exclusión. Ésta puede asumirse como “...una acumulación de procesos confluyentes con rupturas sucesivas que, arrancando del corazón de la economía, la política y la sociedad, van alejando e ‘inferiorizando’ a personas, grupos, comunidades y territorios con respecto a los centros de poder, los recursos y los valores dominantes” (Estivill, 2003, p. 29-30 citado por Rizo, 2006, p. 5).

Jiménez y Ruiz (2018) destacan que, en México, las personas con PCD enfrentan dificultades para ejercer plenamente sus derechos sociales y humanos, debido a tres aspectos que les ha perpetuado como un sector demográfico con significativa vulnerabilidad o exclusión social, estos son: 1) su mínima participación en el mercado laboral, 2) la limitada atención de los servicios de salud y 3) una incipiente accesibilidad a los sistemas públicos y privados. Estos factores contribuyen a diversas consecuencias negativas, entre ellas: 1) limitadas capacidades productivas, 2) falta de independencia de los núcleos familiares, 3) bajo desarrollo humano para la vida independiente, 4) mínimo nivel de empoderamiento y 5) constantes situaciones de discriminación.

jóvenes, 3) personas mayores, 4) mujeres, 5) pueblos indígenas, 6) población afrodescendiente, 7) personas con discapacidad, 8) habitantes de zonas rezagadas, 9) las personas lesbianas, gays, bisexuales, trans e intersexuales, 10) migrantes y aquellos desplazados por conflictos y 11) la población afectada por los desastres y el cambio climático. En México, el concepto usado por la Comisión de Atención a Grupos Vulnerables hace referencia toda persona o grupo que por sus características de desventaja asociadas con: edad, sexo, estado civil; nivel educativo, origen étnico, situación o condición física y/o mental; requieren de un esfuerzo adicional para incorporarse al desarrollo y a la convivencia.

⁵ La idea de inclusión social alude a la posibilidad de ejercer efectivamente derechos sociales, civiles, económicos y culturales, en contraposición a los procesos de vulneración de derechos y bienestar social (Capriati, 2015).

Esto, a pesar de que el artículo 1° de la Constitución mexicana prohíbe la discriminación causada por alguna discapacidad en las personas. De acuerdo con la Constitución mexicana, los tratados internacionales y en particular la Ley General para la Inclusión de las Personas con Discapacidad, este sector de la población debe gozar de sus derechos humanos en términos de igualdad y sin discriminación, entre ellos los siguientes: 1) Derecho a la inclusión, a la no exclusión o distinción de ningún tipo, restricción o preferencia basada en su discapacidad, 2) Derecho al trato con dignidad y respeto, 3) Derecho a trabajar de acuerdo con sus capacidades y a recibir un salario igualitario, 4) Derecho a la igualdad y protección ante la ley, 5) Derecho a un alto estándar de salud para un tratamiento médico, psicológico, funcional y de rehabilitación médica y social, 6) Derecho a la movilidad, y 7) Derecho a la accesibilidad.

3.2. La población con discapacidad en la República Mexicana

De acuerdo con el INEGI, en 2020, en México habitaban 20 838 108 personas con discapacidad, limitación o con algún problema o condición mental (PDLM), esto es 16.5% de la población total del país. Las cinco entidades con más población que presentaron estas características fueron: México (2 786 679), Ciudad de México (1 703 827), Veracruz (1 542 272) y Jalisco (1 264 817). El estado de Guerrero ocupó el lugar décimo primero a nivel nacional con 669 526 personas (3.2 % de la población mexicana con esas características) (Tabla 2). Por otra parte, con base en el porcentaje que representaron las PDLM en relación con el total de habitantes estatal, destacaron: Oaxaca (20.39), Hidalgo (19.34), Veracruz de Ignacio de la Llave (19.13), Morelos (19.08) y Guerrero (18.91) (Tabla 3). En el territorio nacional se registraron 2 939 986 personas con dificultades para caminar, subir o bajar escaleras, 2 691 338 personas expresaron tener problemas para ver aun usando lentes, 1 590 583 personas con padecimientos en sus facultades mentales, 1 350 802 tenían dificultades al oír (incluso con ayuda de un aparato auditivo), 1 168 098 les resultó complicado bañarse, vestirse o comer, 1 149 257 personas les costó recordar o concentrarse y 945 162 personas presentaron dificultades para hablar o comunicarse. El INEGI contabilizó

5 003 159 PDLM sin ninguna cobertura de servicio médico, las entidades con más población en esa situación fueron: México (844 510), Ciudad de México (398 006), Veracruz de Ignacio de la Llave (396 290), Jalisco (346 076) y Michoacán de Ocampo (286 183). Los porcentajes de PDLM sin filiación, respecto al total estatal de PDLM, fueron elevados en: Oaxaca (20.39), Hidalgo (19.34), Veracruz (19.13), Morelos (19.08) y Guerrero (18.91) (Tabla 5).

Tabla 2. República Mexicana: PDLM*, 2020.

Unidad territorial	Habitantes	%
México	2786679	13.37
Ciudad de México	1703827	8.18
Veracruz de Ignacio de la Llave	1542272	7.40
Jalisco	1264817	6.07
Puebla	1016831	4.88
Guanajuato	935673	4.49
Oaxaca	842598	4.04
Michoacán de Ocampo	826874	3.97
Nuevo León	806079	3.87
Chiapas	670314	3.22
Guerrero	669526	3.21
Hidalgo	596154	2.86
Chihuahua	587035	2.82
Tamaulipas	577731	2.77
Baja California	541359	2.60
San Luis Potosí	496661	2.38
Sinaloa	489533	2.35
Sonora	481623	2.31
Coahuila de Zaragoza	454870	2.18
Yucatán	414852	1.99
Tabasco	413069	1.98
Morelos	376173	1.81
Querétaro	355047	1.70
Durango	329270	1.58
Zacatecas	303983	1.46
Aguascalientes	245551	1.18
Quintana Roo	241795	1.16
Nayarit	231813	1.11
Tlaxcala	203625	0.98

Campeche	170452	0.82
Colima	131520	0.63
Baja California Sur	130 502	0.63
<i>Estados Unidos Mexicanos</i>	<i>20 838 108</i>	<i>100.00</i>

Fuente: elaborado con base en INEGI (2020).

* PDLM: población con discapacidad, limitación o con algún problema o condición mental.

Tabla 3. República Mexicana: porcentaje de PDLM respecto al total de habitantes, 2020.

Unidad territorial	Habitantes	PDLM	%
Oaxaca	4 132 148	842 598	20.39
Hidalgo	3 082 841	596 154	19.34
Veracruz de Ignacio de la Llave	8 062 579	1 542 272	19.13
Morelos	1 971 520	376 173	19.08
Guerrero	3 540 685	669 526	18.91
Nayarit	1 235 456	231 813	18.76
Zacatecas	1 622 138	303 983	18.74
Ciudad de México	9 209 944	1 703 827	18.50
Campeche	928 363	170 452	18.36
Colima	731 391	131 520	17.98
Durango	1 832 650	329 270	17.97
Yucatán	2 320 898	414 852	17.87
San Luis Potosí	2 822 255	496 661	17.60
Michoacán de Ocampo	4 748 846	826 874	17.41
Aguascalientes	1 425 607	245 551	17.22
Tabasco	2 402 598	413 069	17.19
<i>Estados Unidos Mexicanos</i>	<i>126 014 024</i>	<i>20 838 108</i>	<i>16.54</i>
México	16 992 418	2 786 679	16.40
Tamaulipas	3 527 735	577 731	16.38
Sonora	2 944 840	481 623	16.35
Baja California Sur	798 447	130 502	16.34
Sinaloa	3 026 943	489 533	16.17
Chihuahua	3 741 869	587 035	15.69
Puebla	6 583 278	1 016 831	15.45
Guanajuato	6 166 934	935 673	15.17
Tlaxcala	1 342 977	203 625	15.16
Jalisco	8348151	1 264 817	15.15
Querétaro	2 368 467	355 047	14.99
Coahuila de Zaragoza	3 146 771	454 870	14.46
Baja California	3 769 020	541 359	14.36

Nuevo León	5 784 442	806 079	13.94
Quintana Roo	1 857 985	241 795	13.01
Chiapas	5 543 828	670 314	12.09

Fuente: elaborado con base en INEGI (2020).

Tabla 4. República Mexicana: PDLM sin afiliación a servicios de salud, 2020.

Unidad territorial	PDLM sin afiliación	%
México	844 510	16.88
Ciudad de México	398 006	7.96
Veracruz de Ignacio de la Llave	396 290	7.92
Jalisco	346 076	6.92
Michoacán de Ocampo	286 183	5.72
Puebla	267 694	5.35
Oaxaca	231 745	4.63
Chiapas	217 009	4.34
Guanajuato	174 209	3.48
Guerrero	165 525	3.31
Hidalgo	160 234	3.20
Nuevo León	136 020	2.72
Tabasco	123 019	2.46
Baja California	114 339	2.29
Tamaulipas	106 952	2.14
Morelos	93 369	1.87
Chihuahua	81 557	1.63
San Luis Potosí	81 445	1.63
Sonora	79 561	1.59
Coahuila de Zaragoza	79 120	1.58
Yucatán	78 718	1.57
Sinaloa	78 442	1.57
Durango	71 858	1.44
Querétaro	69 148	1.38
Zacatecas	57 772	1.15
Quintana Roo	57 604	1.15
Tlaxcala	47 901	0.96
Nayarit	45 966	0.92
Aguascalientes	40 454	0.81
Campeche	33 857	0.68
Colima	19 843	0.40
Baja California Sur	18 733	0.37

Estados Unidos Mexicanos 5 003 159 100.00

Fuente: elaborado con base en INEGI (2020).

Tabla 5. República Mexicana: porcentaje sin afiliación a servicios de salud, 2020.

Unidad territorial	PDLM	PDLM sin afiliación	%
Oaxaca	4 132 148	842 598	20.39
Hidalgo	3 082 841	596 154	19.34
Veracruz de Ignacio de la Llave	8 062 579	1 542 272	19.13
Morelos	1 971 520	376 173	19.08
Guerrero	3 540 685	669 526	18.91
Nayarit	1 235 456	231 813	18.76
Zacatecas	1 622 138	303 983	18.74
Ciudad de México	9 209 944	1 703 827	18.50
Campeche	928 363	170 452	18.36
Colima	731 391	131 520	17.98
Durango	1 832 650	329 270	17.97
Yucatán	2 320 898	414 852	17.87
San Luis Potosí	2 822 255	496 661	17.60
Michoacán de Ocampo	4 748 846	826 874	17.41
Aguascalientes	1 425 607	245 551	17.22
Tabasco	2 402 598	413 069	17.19
<i>Estados Unidos Mexicanos</i>	<i>126 014 024</i>	<i>20 838 108</i>	<i>16.54</i>
México	16 992 418	2 786 679	16.40
Tamaulipas	3 527 735	577 731	16.38
Sonora	2 944 840	481 623	16.35
Baja California Sur	798 447	130 502	16.34
Sinaloa	3 026 943	489 533	16.17
Chihuahua	3 741 869	587 035	15.69
Puebla	6 583 278	1 016 831	15.45
Guanajuato	6 166 934	935 673	15.17
Tlaxcala	1 342 977	203 625	15.16
Jalisco	8 348 151	1 264 817	15.15
Querétaro	2 368 467	355 047	14.99
Coahuila de Zaragoza	3 146 771	454 870	14.46
Baja California	3 769 020	541 359	14.36
Nuevo León	5 784 442	806 079	13.94
Quintana Roo	1 857 985	241 795	13.01
Chiapas	5 543 828	670 314	12.09

Fuente: elaborado con base en INEGI (2020).

3.3. La población con discapacidad en el estado de Guerrero

El estado de Guerrero está conformado por 81 municipios, los cuales se agrupan en las regiones siguientes: Acapulco, Centro, Costa Chica, Costa Grande, Montaña, Norte y Tierra Caliente⁶ (Figura 1). En Guerrero, se registraron 410 865 PCD, los municipios con mayor presencia de este tipo de población fueron: Acapulco de Juárez con 22.61% del monto guerrerense, Chilpancingo de los Bravo con 6.02%, Iguala de la Independencia con 3.56%, Taxco de Alarcón con 3.47 % y Zihuatanejo de Azueta con 3.09 %. Cabe destacar que la PCD constituyó porcentajes notables, respecto al total de habitantes a nivel municipal, en diecisiete jurisdicciones, entre ellas: Tlacoapa, Pilcaya, Tlalixtaquilla de Maldonado, Atenango del Río, Tlalchapa, Zapotitlán Tablas, Tepecoacuilco de Trujano, Ahuacuotzingo, Azoyú y La Unión de Isidoro Montes de Oca, cuyos valores que oscilaron entre 15 y 20% (Figura 2). El panorama regional también advirtió diferencias relevantes, Acapulco reunió 23.40% de la PCD del estado, la región Centro 17.82%, Costa Chica 13.59%, Norte 13.14%, Costa Grande 12.18%, Montaña 11.55% y la Tierra Caliente 8.31%.

En el Censo de Población y Vivienda 2020, se contemplaron siete *ítems* para medir la discapacidad o la limitación según el tipo de actividad cotidiana que realiza la población o bien aquella que presenta algún problema o condición mental, estos son: 1) ver aun usando lentes, 2) oír aun usando aparato auditivo, 3) caminar, subir o bajar, 4) recordar o concentrarse, 5) bañarse, vestirse o comer, 6) hablar o comunicarse y 7) población con algún problema o condición mental. El panorama regional, para cada uno de estos *ítems*, mostró la misma configuración territorial descrita al final del párrafo anterior (Tabla 6).

⁶ De acuerdo con García (2020), las regiones de Acapulco y Centro son las más dinámicas en términos socioeconómicos. Allí se concentran los asentamientos humanos con mayor número de habitantes (Acapulco, Chilpancingo e Iguala). En constaste, las regiones de La Montaña y la Costa Chica han sido áreas caracterizadas por las condiciones económicas y sociales más adversas de la entidad.

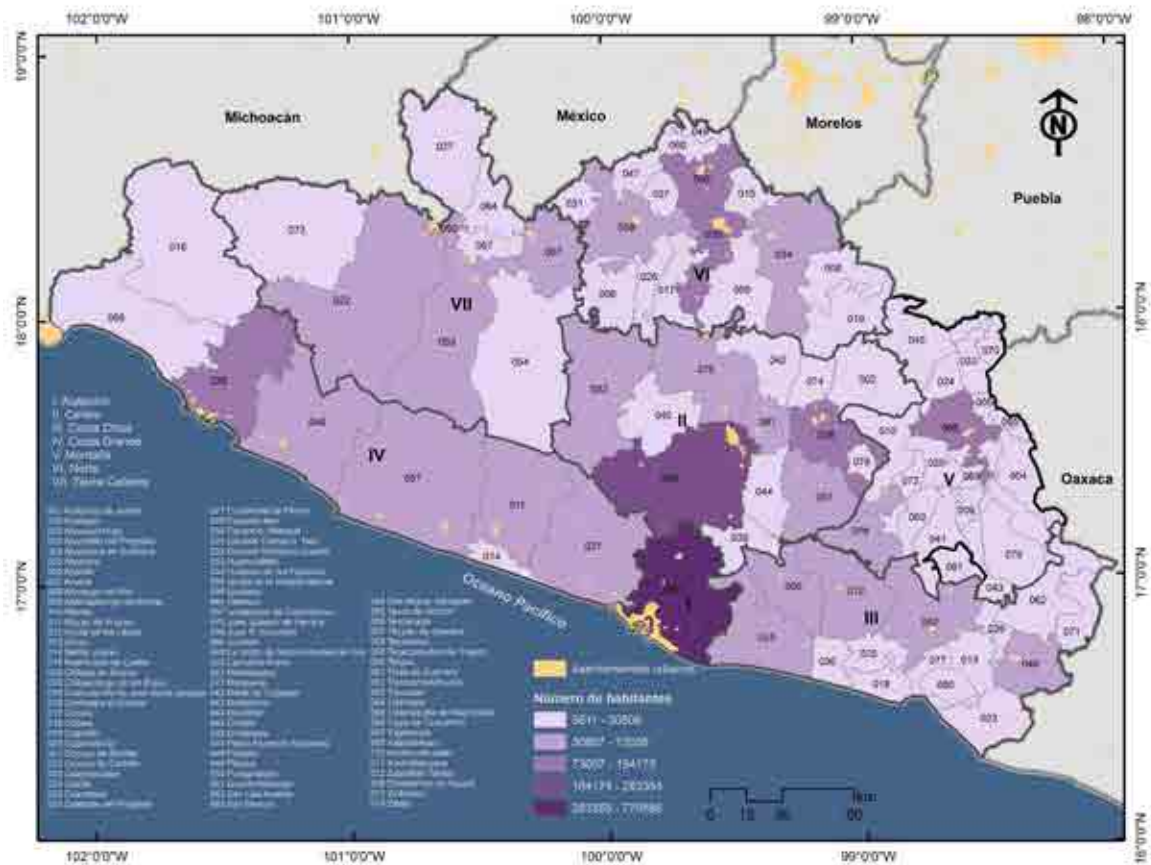


Figura 1. Guerrero: división político-administrativa, 2020.

Fuente: INEGI (2020).

Por otra parte, en cuanto al primer *ítem*, cabe destacar que en el estado de Guerrero hay 91 021 personas que tienen dificultad o no pueden ver adecuadamente. Las personas con este tipo de discapacidad representaron porcentajes notables en veintiséis jurisdicciones, con valores que oscilaron entre 3.0 y 5.6% del total de habitantes de cada una de ellas. Destacaron: Tlacoapa (5.57 %), Pilcaya (4.48%), Juchitán (4.03%), Azoyú (3.88%) y Tlalchapa (3.88%) (Figura 3). El resto de las jurisdicciones constituyeron menos de 2%.

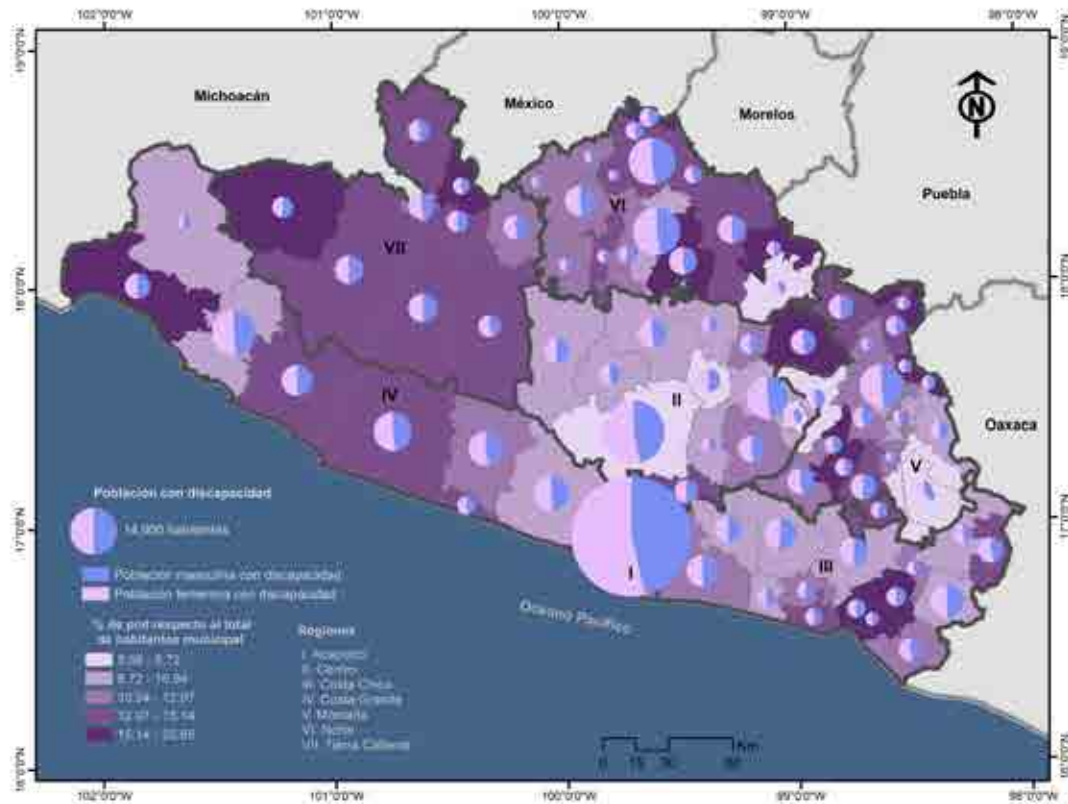


Figura 2. Guerrero: población con discapacidad, 2020.

Fuente: INEGI (2020).

El ítem 2 reveló que en el territorio guerrerense existen 49 863 personas con dificultades para oír (incluso utilizando algún aparato auditivo). La información relacionada con este tipo de discapacidad mostró la presencia de dieciséis unidades territoriales con valores notables (entre 2 y 3.6% del total de habitantes). Los municipios que sobresalieron fueron: Tlacoapa con 3.60%, Zapotitlán Tablas con 3.10%, Xochihuehuetlán con 2.65%, Atenango del Río 2.56% y Cuetzala del Progreso 2.54%. El resto de las demarcaciones no superó el 1.8% (Figura 4).

Tabla 6. Regiones del estado de Guerrero: distribución porcentual de los ítems evaluados.

Unidad territorial	PD1	PD2	PD3	PD4	PD5	PD6	PD7
Acapulco	23.36	18.72	24.55	21.48	22.02	19.77	24.54
Centro	16.59	17.72	16.30	17.39	17.32	18.69	18.70
Costa Chica	12.96	13.49	12.36	13.07	12.10	13.17	13.32
Costa Grande	13.29	11.24	12.17	12.12	12.77	12.39	13.33
Montaña	12.10	14.79	10.78	13.33	11.46	13.32	9.33
Norte	14.23	15.68	15.15	14.71	15.69	14.39	14.06
Tierra Caliente	7.46	8.36	8.70	7.90	8.64	8.27	6.72
<i>Estado de Guerrero</i>	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>100</i>

Fuente: elaborado con base en INEGI (2020).

Nota: Abreviaturas relacionadas con la actividad que desarrollan las personas con dificultad: 1) PD1: ver aun usando lentes, 2) PD2: oír aun usando aparato auditivo, 3) PD3: caminar, subir o bajar escaleras, 4) PD4: recordar o concentrarse, 5) PD5: bañarse, vestirse o comer, 6) PD6: hablar o comunicarse y 7) PD7: población con algún problema o condición mental.

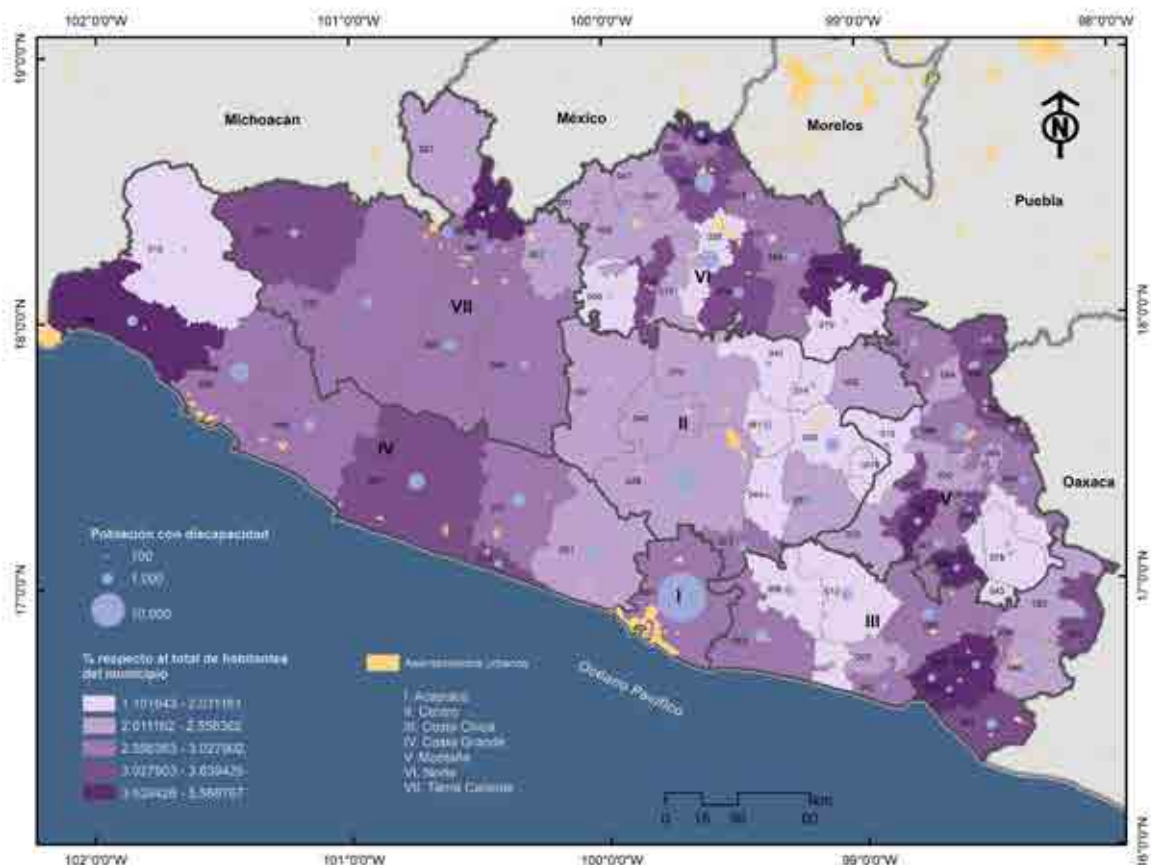


Figura 3. Guerrero: distribución territorial del ítem 1, 2020.

Fuente: INEGI (2020).

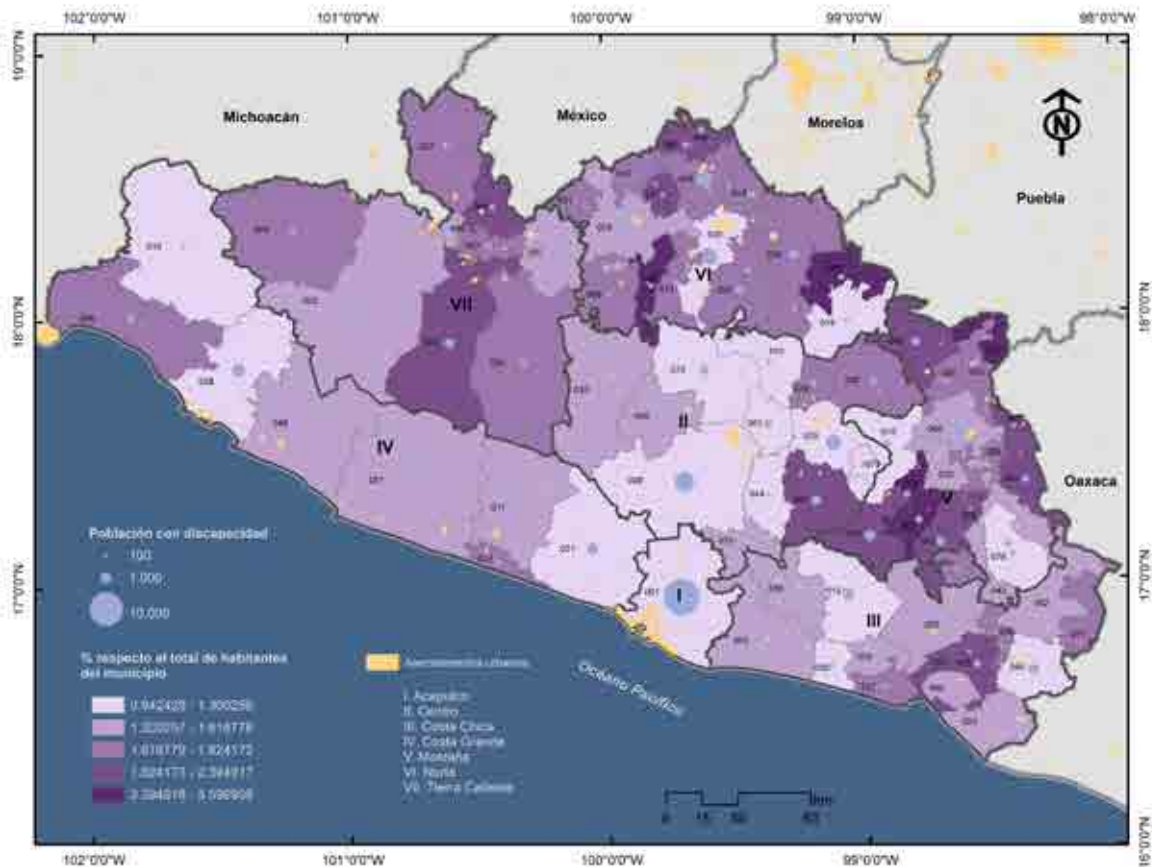


Figura 4. Guerrero: distribución territorial del ítem 2, 2020.

Fuente: INEGI (2020).

La población que reportó tener dificultad para caminar, subir o bajar escaleras fue de 107 763 personas. Este ítem tuvo valores notorios en dieciocho municipios, con valores comprendidos entre 4 y 4.7% del total de habitantes del municipio en cuestión, entre ellos: Atenango del Río 4.78%, Cutzamala de Pinzón 4.67%, Tepecoacuilco de Trujano 4.66%, Azoyú 4.61%, Xochihuehuetlán 4.55%, Zirándaro 4.55% y Buenavista de Cuéllar 4.51%. En las unidades territoriales restantes, no se rebasó 4% (Figura 5). Por otra parte, la población con dificultades para recordar o concentrarse fue de 41 721 personas. Este tipo de discapacidad tuvo valores sobresalientes en: Tlacoapa (2.65%), Ahuacutzingo (2.57%), Tlalixtaquilla de Maldonado (2.42%), Zapotitlán Tablas (2.03%) y Juchitán (2.00%). En

contraste, las setenta y seis demarcaciones restantes, las personas con este tipo de discapacidad representó entre 0.69 y 1.93% del total de habitantes municipal (Figura 6). Por lo que respecta al *ítem* 5, en el estado se identificaron 37 624 personas que reportaron dificultades para realizar las actividades siguientes: bañarse, vestirse o comer. Los montos notables se identificaron en: Tlaxiataquilla de Maldonado (1.80%), La Unión de Isidoro Montes de Oca (1.65%), Ahuacuotzingo (1.63%), Apaxtla (1.59%), Tlalchapa (1.58%), Coyuca de Catalán (1.56%), Buenavista de Cuéllar (1.53%) y Juchitán (1.51%). En el resto de la entidad, los porcentajes oscilaron entre 0.6 y 1.5 (Figura 7). La población con dificultades para hablar o comunicarse sumaron 36 130 personas, destacaron los municipios de Ahuacuotzingo (2.44%), Tlacoapa (2.05%), Tlaxiataquilla de Maldonado (1.97%), Apaxtla (1.74%), La Unión de Isidoro Montes de Oca (1.56%) y Tlalchapa (1.52%) (Figura 8). En las demás demarcaciones los valores fluctuaron entre 0.67 y 1.49%. Por último, el *ítem* 7 mostró que en la entidad hay 46 743 personas con algún problema o condición mental, se presentaron valores significativos en: Pilcaya (3.19%), Tepecoacuilco de Trujano (1.97%), La Unión de Isidoro Montes de Oca (1.79%), Atoyac de Álvarez (1.78%), Cutzamala de Pinzón (1.76%), Iliatenco (1.71%) y Ajuchitlán del Progreso (1.70%) (Figura 9).

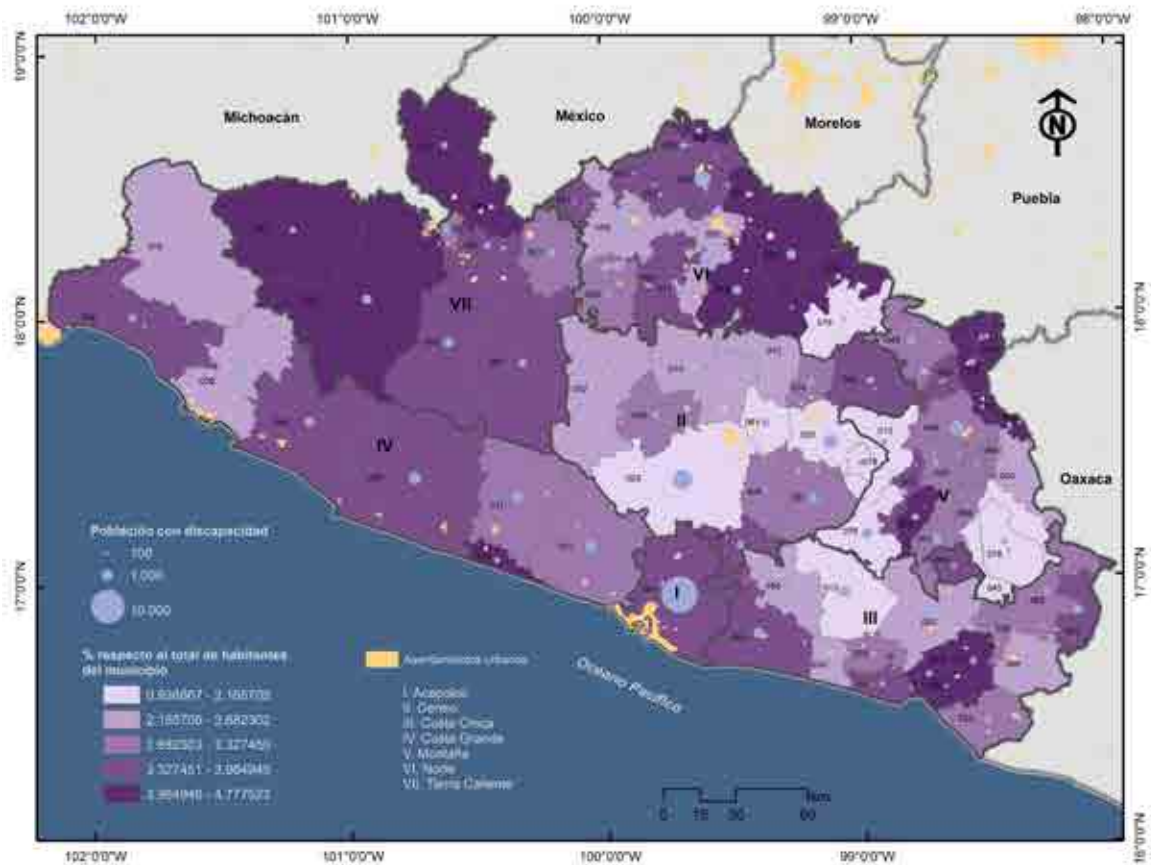


Figura 5. Guerrero: distribución territorial del ítem 3, 2020.

Fuente: INEGI (2020).

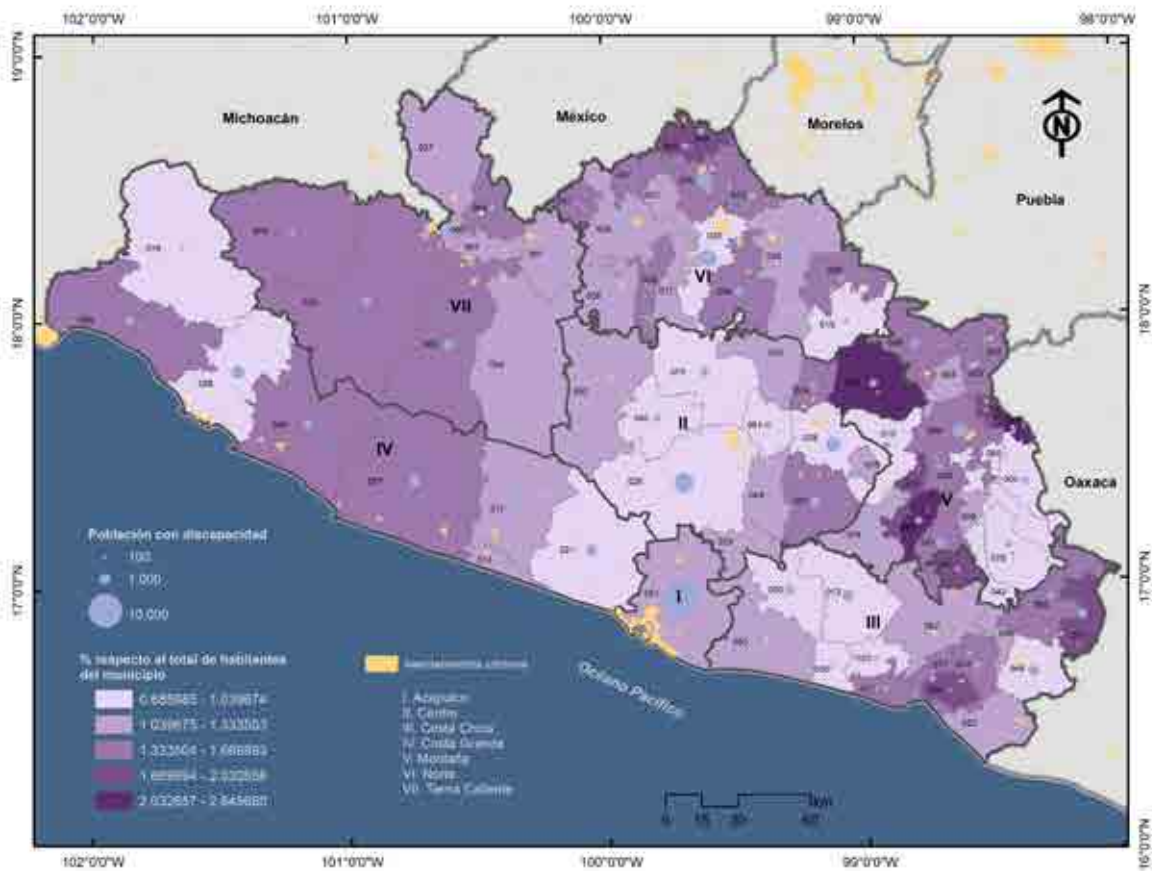


Figura 6. Guerrero: distribución territorial del ítem 4, 2020.

Fuente: INEGI (2020).

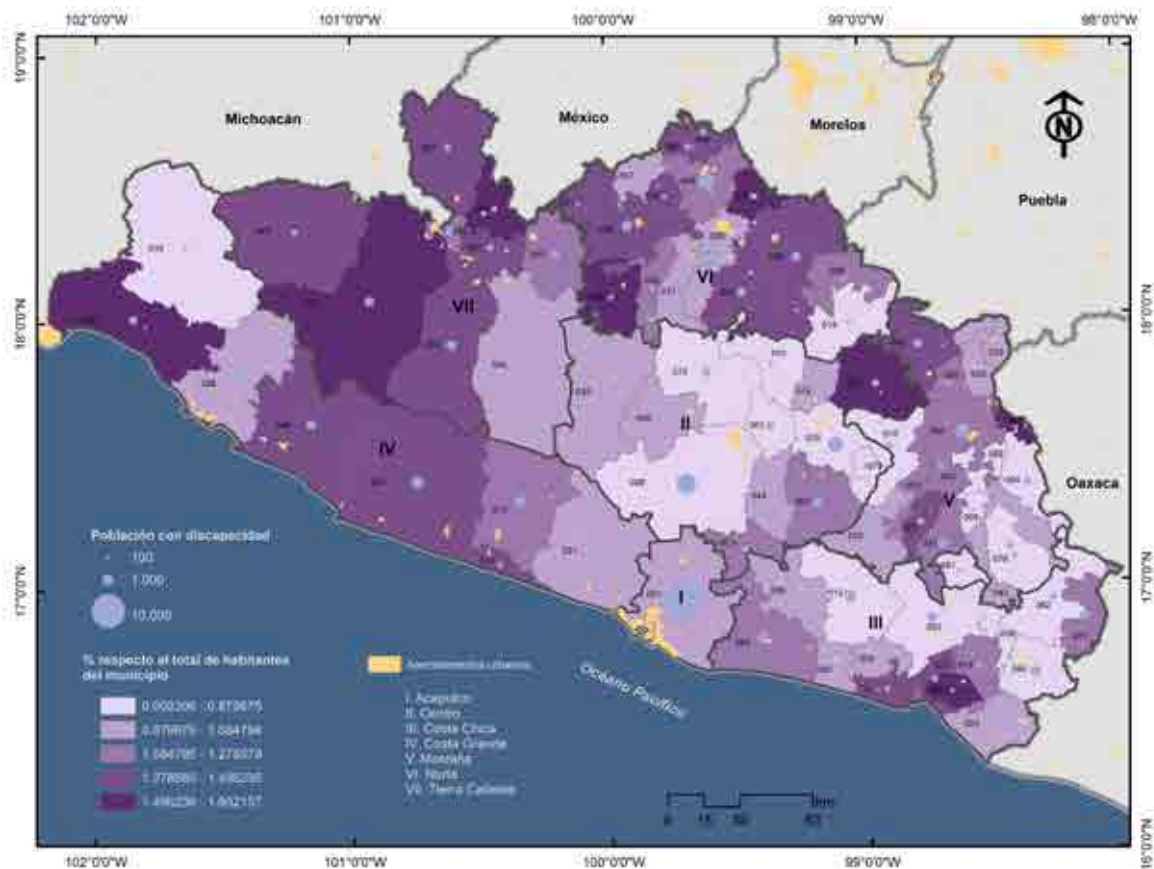


Figura 7. Guerrero: distribución territorial del *ítem* 5, 2020

Fuente: INEGI (2020).

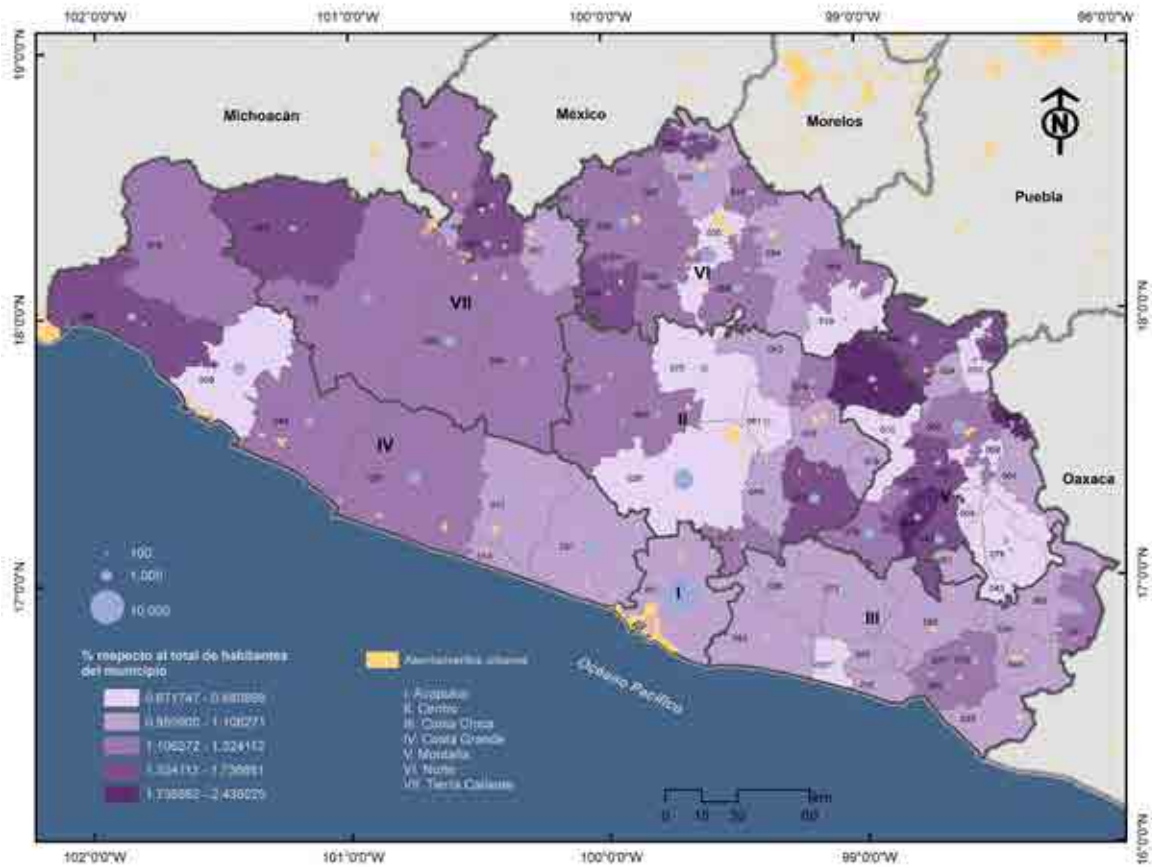


Figura 8. Guerrero: distribución territorial del ítem 6, 2020

Fuente: INEGI (2020).

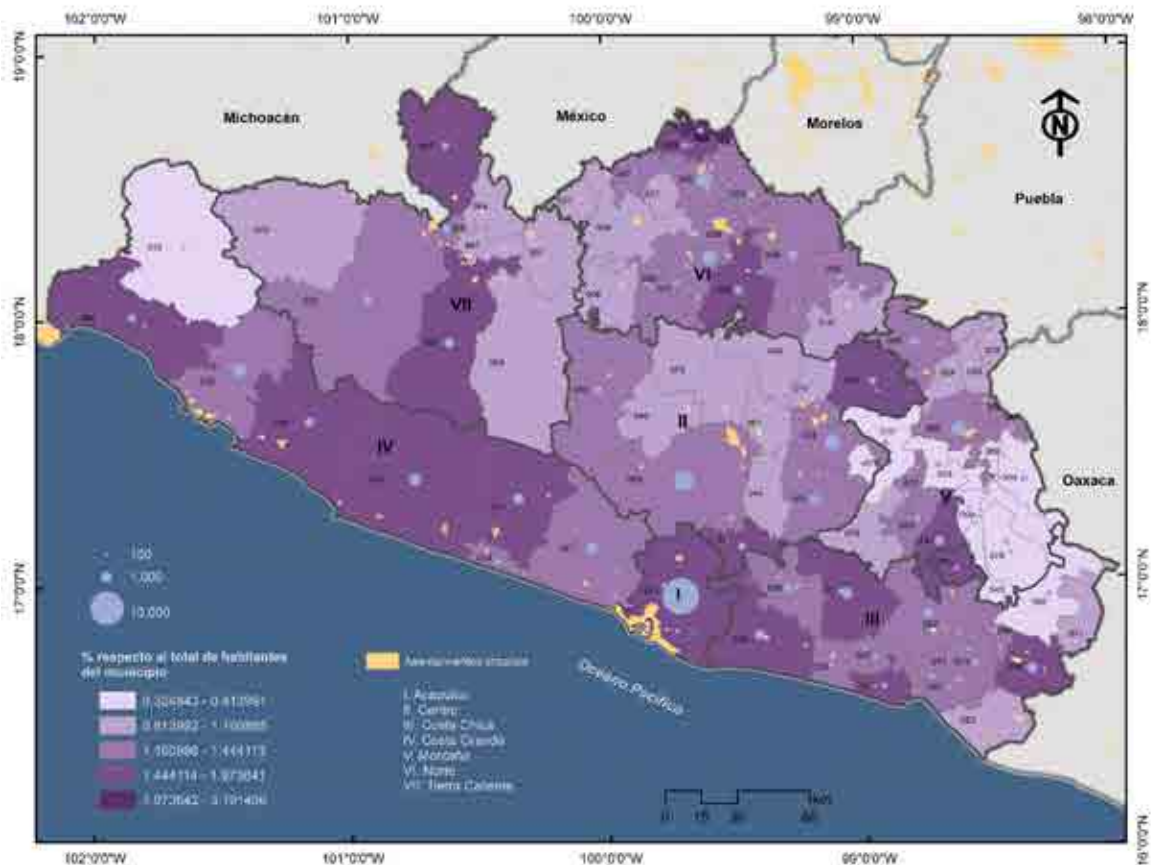


Figura 9. Guerrero: distribución territorial del ítem 7, 2020.

Fuente: INEGI (2020).

En cuanto a la causa, los municipios con porcentajes importantes de personas cuya discapacidad es de nacimiento fueron: Acatepec (30.07%), Zapotitlán Tablas (28.26%), Coahuayutla de José María Izazaga (27.75%), Cochoapa el Grande (23.98%) y José Joaquín de Herrera (23.74%). La discapacidad originada por enfermedad tuvo presencia notable en los municipios de: Tetipac (50.31%), Florencio Villarreal (49.86%), Tépam de Galeana (49.52%), Copala (49.26%) y Pilcaya (48.69%). Las personas con discapacidad debido a algún accidente son numerosas en los municipios siguientes: Zapotitlán Tablas (23.15%), Buenavista de Cuéllar (18.63%), Coyuca de Catalán (18.52%), Huamuxtitlán (18.44%) y Acatepec (15.93%). Las demarcaciones con porcentajes notables de personas con

discapacidad derivada de su edad avanzada fueron: Pungarabato (50.90%), Metlatónoc (50.27%), Atlamajalcingo del Monte (48.02%), Cochoapa el Grande (47.96%) y Apaxtla (47.63%). Los porcentajes de población con discapacidad sin afiliación a servicios de salud fueron sobresalientes en los municipios de: Cutzamala de Pinzón (53.72%), Pungarabato (47.27%), General Canuto A. Neri (46.82%), Tlapehuala (45.61%) y Cuetzala del Progreso (44.18%).

Con base en lo expuesto en los párrafos precedentes, es importante señalar que la consulta de la información del Censo de Población y Vivienda 2020 de INEGI permitió advertir que el tema de la PCD a nivel de entidades federativas presentó un número importante de variables sociodemográficas (tipo de discapacidad, causa de ésta, alfabetismo, escolaridad, actividad económica, afiliación a los servicios de salud), desagregadas por edad y sexo. Desafortunadamente, a nivel municipal no se contó con todas esas variables lo que limitó el análisis de aquellos aspectos que según algunos estudiosos, les ha perpetuado como un sector demográfico con significativa vulnerabilidad o exclusión social (como son su mínima participación en el mercado laboral, la limitada atención de los servicios de salud y una incipiente accesibilidad a los sistemas públicos y privados). No obstante, el examen dio pauta para identificar escenarios socioterritoriales generales que a la postre deben ser afinados con la implementación de trabajo en campo y, en consecuencia, con el trato directo con los actores locales. *Grosso modo*, se pudieron distinguir aquellas unidades territoriales en las que la discapacidad podría representar un problema de salud emergente en el estado de Guerrero, tanto a nivel municipal como a nivel regional. En particular sí se considera que, tal y como se enfatiza en la literatura especializada, las condiciones adversas de salud de la PCD suelen estar estrechamente relacionadas con las desigualdades y disparidades que ésta presenta en el acceso a la atención sanitaria. Una situación que se hizo patente en municipios como Cutzamala de Pinzón, Pungarabato, General Canuto A. Neri, Tlapehuala y Cuetzala del Progreso. Estas demarcaciones podrían concebirse como ejemplo de “...una acumulación de procesos confluyentes con rupturas sucesivas que,

arrancando del corazón de la economía, la política y la sociedad, van alejando e ‘inferiorizando’ a personas, grupos, comunidades y territorios con respecto a los centros de poder, los recursos y los valores dominantes” (Estivill, 2003, p. 29-30 citado por Rizo, 2006, p. 5).

4. Conclusiones

Esta investigación tuvo como propósito identificar las diferencias territoriales asociadas con la distribución de la pcd al interior del estado de Guerrero. La información dada a conocer por el INEGI, en 2020, dio pauta para distinguir que este sector de la población tiene presencia notable en esta entidad del sur de México. Con base al total nacional de PCD, el territorio guerrerense ocupó el décimo primer lugar y la posición número cinco, por el porcentaje que constituyó este grupo respecto a la población total guerrerense. En Guerrero, los municipios con mayor cantidad de PCD coincidieron con las demarcaciones más pobladas del estado: Acapulco, Chilpancingo de los Bravo, Iguala de la Independencia, Taxco de Alarcón y Zihuatanejo de Azueta. Este patrón territorial también pudo observarse cuando se analizaron los montos de la PCD a nivel regional, ya que destacaron aquellas áreas que históricamente se han concebido como las de mayor relevancia socioeconómica para el entramado estatal; entre ellas Acapulco y la región Centro. Sin embargo, el panorama fue otro cuando se tomó como indicador a la proporción que representó la PCD en relación al total de habitantes de cada jurisdicción en cuestión, en ese caso despuntaron varios municipios pertenecientes a las regiones con condiciones socioeconómicas adversas de la entidad (La Montaña y la Costa Chica), con valores que oscilaron entre 15 y 20%.

Otro hallazgo interesante estuvo relacionado con las unidades territoriales que sobresalieron, simultáneamente, en varios de los *ítems* censales tomados en cuenta en el presente análisis, el primero de ellos fue Tlacoapa, municipio perteneciente a la región de La Montaña, con porcentajes notables en cuatro de los siete *ítems* evaluados. En orden de importancia, le siguieron las demarcaciones de Tlalixtaquilla (La Montaña), Ahuacotzingo

(región Centro) y La Unión (Costa Grande), con valores significativos en tres *ítems*. Y el grupo con cifras importantes en dos *ítems* fue el más numeroso, en total los ocho municipios siguientes: Pilcaya (región Norte), Buenavista de Cuellar (región Norte), Apaxtla (región Norte), Xochihuehuetlan (La Montaña), Zapotitlán (La Montaña), Zirándaro (Tierra Caliente), Tlalchapa (Tierra Caliente) y Juchitán (Costa Chica). También fueron sintomáticos de las condiciones de vulnerabilidad y/o exclusión social en que vive la PCD guerrerense, los porcentajes de ésta que reportaron no estar afiliados a los servicios de salud, en particular en aquellos municipios donde cerca de la mitad de este tipo población reportó tal situación (Cutzamala de Pinzón, Pungarabato, General Canuto A. Neri, Tlapehuala y Cuetzala del Progreso).

Con base en lo mencionado arriba, se tienen elementos sólidos para proponer que el examen de la distribución territorial de PCD *per se* tiene posibilidades amplias como referente en el diseño de políticas públicas relacionadas con la atención este grupo social, toda vez que los tabulados censales dan pauta para identificar: 1) en cuáles regiones y/o demarcaciones municipales específicas la presencia de la PCD es notable, 2) la limitación según el tipo de actividad cotidiana que realiza la población o bien algún problema o condición mental, 3) la causa que dio lugar a esta condición y 4) la proporción de PCD sin filiación a algún servicio de salud. Este conjunto de particularidades puede tomarse en cuenta no sólo para diseñar medidas enfocadas en el cuidado de las PCD sino también orientadas a la prevención de esta condición. No obstante, el presente estudio también reveló la notoria falta de un mayor número de variables censales que den pauta para una caracterización sociodemográfica más detallada de las PCD (edad, género, grupo étnico, entre otras), ya que este sector de la población suelen estar expuesto a desigualdades entrelazadas que les sitúa en una situación de vulnerabilidad y en lo sucesivo exclusión social; por ejemplo, en el caso de las mujeres indígenas o afrodescendientes en condición de discapacidad, ser mujer se relaciona con la desigualdad de género que se propaga en los

diversos ámbitos sociales, y la condición étnico-racial, así como la discapacidad, se vuelve un elemento de exclusión.

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

5. Referencias

Carrera, C., Del Canto, C., Gutiérrez, J., Méndez, R. y Ma. C. Pérez (1998). *Trabajos prácticos en Geografía Humana*. Madrid, España. Editorial Síntesis.

Capriati, A. J. (2015). Desigualdades y vulnerabilidades en la condición juvenil: el desafío de la inclusión social. *Convergencia*, 22(69), pp. 131-150. Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-14352015000300131&lng=es&tlng=es.

Castel, R. (1995). *Les métamorphoses de la question sociale*. Gallimard, París.

Estevill, J. (2003). *Panorama de la lutte contre l'exclusion sociale. Concepts et stratégies*. Ginebra: Bureau international du Travail. Recuperado de: https://www.ilo.org/public/libdoc/ilo/2003/103B09_267_fren

Flores, L. L., (2010). Las personas discapacitadas como grupo vulnerable a la luz de la Constitución mexicana. *IUS. Revista del Instituto de Ciencias Jurídicas de Puebla A.C.*, IV (26), pp. 113-125. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/2932/293222980007.pdf>

García, N. (2020). Estructura territorial de la economía guerrerense: una interpretación geográfica. Porrúa-Print. <https://bit.ly/35UDQLr>

INEGI. (2020). INEGI. (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/default.html>

Jiménez, J. C. y Ruiz, E. F. (2018). Vulnerabilidad de las personas con discapacidad en México. *Cinzontle*, julio-diciembre, pp. 22-28. Recuperado de:

<https://generaconocimiento.segob.gob.mx/sites/default/files/document/biblioteca/1166/20230224-vulnerabilidad-de-las-personas-con-discapacidad-en-mexico.pdf>

López, J. M. y Navarro, C. (2019). Enseñanza de estocásticos a niños con discapacidad. Un acercamiento epistemológico. *TANGRAM Revista de Educação Matemática* 2(2), pp. 87-101. DOI:[10.30612/tangram.v2i2.9013](https://doi.org/10.30612/tangram.v2i2.9013)

Miranda, I. (2019). Comprensión de la ecuación lineal de estudiantes con discapacidad intelectual del segundo grado de secundaria. Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Matemática Educativa de la Universidad Autónoma de Guerrero. Recuperado de: <https://ri.uagro.mx/handle/uagro/1005>

Naciones Unidas (s/f). Servicios de salud inclusivos para las personas con discapacidad. Recuperado de: <https://www.un.org/development/desa/dspd/wp-content/uploads/sites/22/2022/01/Inclusive-Health-Spanish.pdf>

Perona, N. y Rocchi, G. (2016) Vulnerabilidad y exclusión social. Una propuesta metodológica para el estudio de las condiciones de vida de los hogares. *Revista Kairós*, 8. Recuperado de <http://www.revistakairos.org/k08-08>.

Peña, E. Y. (2008). Discapacidad: Entre la vulnerabilidad, discriminación y justicia social. *Ciencia*, abril-junio, pp. 16-22. Recuperado de: https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/59_2/PDF/04-Art613-p16-22.pdf

Propin, E. (2003). *Teorías y Métodos en Geografía Económica*. Ciudad de México, México. Universidad Nacional Autónoma de México.

Triana, J. L., y Donoso, J. (2016). La discriminación como fenómeno bidireccional. Un estudio exploratorio sobre grupos vulnerables en Acapulco. *Revista Enfoques: Ciencia Política y Administración Pública*, XIV(25), pp. 37-58. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=96049292003>

Vega, H. D., Moreno, N. E. y Carrillo, A. L. (2016). Envejecimiento demográfico, discapacidad y vulnerabilidad social en Guanajuato, México. *RICS Revista Iberoamericana De Las Ciencias De La Salud*, 4(8), pp. 20-37. Recuperado de: <https://rics.org.mx/index.php/RICS/article/view/25>

Vite, M. Á. (2012). La discapacidad en México desde la vulnerabilidad social. *Polis: Investigación y Análisis Sociopolítico y Psicosocial*, 8(2), pp. 153-173. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72625301006>

Riesgos socionaturales asociados a fallas geológicas, algunos casos del centro-sur de México

Socio-natural risks associated with geological faults, some cases in central-southern Mexico

Edgar Angeles Moreno ^{1*}, Isidro Loza Aguirre ¹, Patricia Olvera Flores ²

¹ División de Ingenierías de la Universidad de Guanajuato, Av. Juárez No. 77; Zona Centro; C.P. 36000; Guanajuato, e.angeles@ugto.mx e isidro.loza@ugto.mx, <https://orcid.org/0000-0001-5177-1305> y <https://orcid.org/0000-0002-2294-1464>

² Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México, Cerro Coatepec s/n Ciudad Universitaria, Toluca Estado de México C.P. 50110, patiflores2002@yahoo.com.mx, <https://orcid.org/0000-0002-3847-7248>

*Autor de correspondencia

Recibido: 09/12/2024. Aceptado: 13/01/2025. Publicado: 21/01/2025.

Cómo citar: Angeles Moreno, E., Loza Aguirre, I., & Olvera Flores, P. (2025). Riesgos socionaturales asociados a fallas geológicas, algunos casos del centro-sur de México. *Geografía Aplicada*, 1(1), 197-239. Consultado de <https://geografiaaplicada.uaemex.mx/article/view/25633>

Resumen

Los riesgos socionaturales están relacionados directa o indirectamente con fallas geológicas en el centro-sur de México. Los riesgos socionaturales que se presentan son de tipo socio-geológicos como deslizamientos de tierra, flujos de detritos, derrumbes de rocas, laderas inestables, terremotos, fallas de subsidencia y flujo de contaminantes en agua subterránea; estos riesgos afectan a centros rurales y urbanos. Los sistemas de falla regionales, fallas San Luis Tepehuanes (SFSLT), fallas de Sierras y Cuencas (*Basin and Range*), fallas de Taxco San Miguel de Allende (SFTSMA) y fallas de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) contienen estructuras de grabenes, pilares estructurales, y zonas de fallas a veces de relaciones complejas. La gestión del riesgo en relación con la presencia de estas fallas geológicas es un tema que requiere ser atendido. En este artículo se exponen algunos casos relacionados a estas problemáticas aplicando metodologías de interpretación geológica de imágenes de satélite, cartografía geológica, geología de campo, geomorfología y algunas relaciones geográficas. Los resultados muestran problemas asociados con riesgos socionaturales y socio-geológicos, por ejemplo, la influencia de las fallas geológicas en la contaminación del agua subterránea por arsénico y flúor en cuencas hidrológicas, los controles en flujos de detritos a lo largo de las fallas San Antonio y San Miguel en el sistema volcánico Nevado de Toluca- San Antonio, problemáticas relacionadas a las fallas de subsidencia hídrica y fallas geológicas en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, y por último fallas geológicas sísmicamente activas del sistema de fallas de Tenango en donde se resalta la importancia de que en las poblaciones afectadas por terremotos existan planes de gestión del riesgo y sistemas de alerta temprana.

Palabras clave: Fallas geológicas, México, Riesgos socionaturales y socio-geológicos.

Abstract

Socio-natural risks are directly or indirectly related to geological faults in south-central Mexico. Socio-natural risks that occur are of a socio-geological type, such as landslides,

debris flows, rock falls, unstable slopes, earthquakes, subsidence faults, and flow of contaminants in groundwater. These risks affect both rural and urban centers. Regional fault systems such as the San Luis Tepehuanes faults (SFSLT), Basin and Range faults, Taxco San Miguel de Allende faults (SFTSMA), and Trans-Mexican Volcanic Belt faults (FVTM) are formed by graben structures, structural pillars, and fault zones that sometimes have complex relationships. Risk management in relation to these geological faults is an issue that requires attention. This work presents some cases related to these problems by applying methodologies considering geological interpretation of satellite images, geological cartography, field geology, geomorphology, and some basic geographic relationships. The results show problems associated with socio-natural and socio-geological risks, such as the influence of geological faults on groundwater contamination, including the presence of arsenic and fluoride in hydrological basins; structural controls on debris flows along the San Antonio and San Miguel faults in Nevado de Toluca-San Antonio volcanic system; problems related to water subsidence faults and geological faults in the Metropolitan Zone of the Toluca Valley and, finally, seismically active geological faults of the Tenango fault system, where the importance of risk management plans and early warning systems in populations affected by earthquakes is highlighted.

Keywords: Geological faults, Mexico, Socio-natural and socio-geological risks.

1. Introducción

Los riesgos socionaturales son planteados como una serie de relaciones socionaturales entre un territorio habitado con una infraestructura civil y su entorno medio ambiental en el que existe una alta probabilidad de que estas relaciones puedan derivar situaciones de riesgos de desastres (Campos-Vargas *et al.*, 2015; Baró-Suárez *et al.*, 2018). De acuerdo con UNISDR (2009) el riesgo está constituido de cuatro componentes básicos: peligro, exposición, vulnerabilidad y resiliencia, cada uno de estos componentes tienen sus propias características físicas y sociales. Las amenazas o peligros naturales son la probabilidad de

que ocurra un evento que por su ubicación, características y severidad puede afectar a seres humanos (Baró-Suárez *et al.*, 2018), estos pueden ser erupciones volcánicas, terremotos, inestabilidades de laderas, deslizamientos de tierra, erosión de suelo, cambios en el nivel de terreno, y fallas geológicas. Las amenazas antrópicas ligadas a actividades económicas de aprovechamiento del medio natural también son consideradas dentro de estos riesgos (Baró-Suárez *et al.*, 2018). En este contexto de riesgos socionaturales, muchas de las fallas geológicas en México se pueden considerar como un riesgo socio-geológico, ya que sistemas de fallas regionales y otras de escala tectónica tienen una influencia directa o indirecta en ciudades o centros urbanos de importancia económica en el país. Los sistemas de fallas que se tratan en este trabajo son algunos sistemas de fallas del centro-sur de México que son sistemas de fallas normales de rumbo NW a NNE, NE-SW, y E-W que afectan a las rocas volcánicas y sedimentarias del Cenozoico, formando fosas, semifosas y pilares tectónicos de dimensiones variadas, los sistemas de fallas de San Luis Tepehuanes (SFSLT) (Nieto-Samaniego *et al.*, 1997; Nieto-Samaniego *et al.*, 2005), sistema de fallas de Sierras y Cuencas (Henry y Aranda-Gómez, 1992; Henry y Aranda-Gómez, 2000) (Figura 1), graben de Aguascalientes (Nieto-Samaniego *et al.*, 1999; 2023), sistemas de fallas Taxco-San Miguel de Allende (SFTSMA) (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002; Alaniz-Álvarez y Nieto-Samaniego, 2005b), y sistema de fallas de la Faja Volcánica Transmexicana (SFFVTM) (Figura 2). Estos sistemas de fallas geológicas no se habían considerado en la categoría de riesgos socio-geológicos que son un tipo de riesgo socionatural para cuando las fallas de estos sistemas cruzan por ciudades importantes del centro-sur de México. Estas fallas se han documentado que determinan controles directos o indirectos en problemas en ciudades y poblaciones como canales de flujos de contaminantes, desplazamientos de acuíferos, intensificadores de erosión, derrumbes, flujos de detritos, fallas de subsidencia, fallas sísmicamente activas y otros. En este artículo se muestran como estos peligros determinan los riesgos.

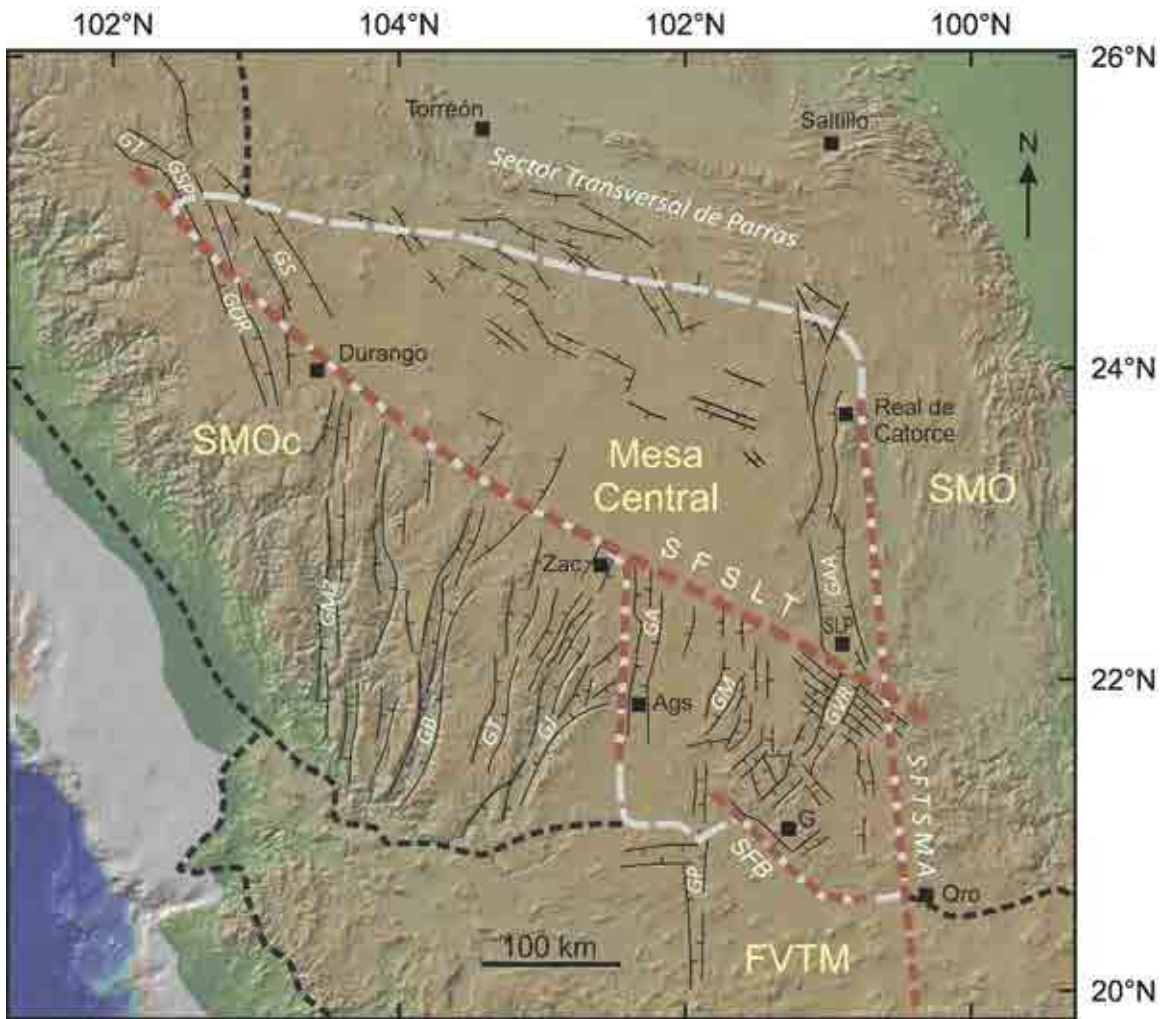


Figura 1. Principales sistemas de fallas en la Mesa Central y sus alrededores. El sistema de fallas San Luis-Tepehuanes de rumbo NW va de San Luis de La Paz en Guanajuato hasta Tepehuanes en Durango y divide a la Mesa Central en sector norte y sur. Localidades en caracteres negros: SLP: San Luis Potosí, Qro: Querétaro, Zac: Zacatecas, Ags: Aguascalientes, G: Guanajuato. Algunas estructuras mayores: GT: Graben Tepehuanes, GSP: Semigraben de Santiago Papasquiaro, GS: Graben de Santiaguillo, GOR: Graben de Otinapa-Río Chico, SFSLT: Sistema de Fallas San Luis Tepehuanes, SFTSMA: Sistema de Fallas Taxco San Miguel de Allende, GMZ: Graben Mezquital, GB: Graben Bolaños, GTL: Graben Tlaltenango, GJ: Graben de Juchipila, GA: Graben de Aguascalientes, GM:

Semigraben de Matancillas, GP: Graben Pajaritos, GVR: Graben de Villa de Reyes, SFB: Sistema de Fallas del Bajío, GAA: Graben Arista Ahualulco, SMOc: Sierra Madre Occidental, SMO: Sierra Madre Oriental, FVTM: Faja Volcánica Transmexicana.

Fuente: figura modificada de Nieto-Samaniego et al. (2023)

2. Marco geológico

En el centro-sur de México los riesgos socio-geológicos están relacionados directa o indirectamente con fallas regionales como son: sistemas de fallas San Luis Tepehuanes (SFSLT), fallas de Sierras y Cuencas (Basin and Range), sistema de fallas de Taxco San Miguel de Allende (SFTSMA) y sistemas de fallas de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). A continuación, se describen sus características.

Sistema de fallas San Luis-Tepehuanes. El sistema de fallas San Luis-Tepehuanes (SFSLT) es un conjunto de fallas normales que integran un gran lineamiento de rumbo NW-SE que se extiende desde San Luis de La Paz, en el estado de Guanajuato, hasta Tepehuanes, en el estado de Durango, con una longitud aproximada de 600 km y edades de actividad que van del Paleoceno-Eoceno al Cuaternario (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005) (Figura 1). Este sistema es el límite entre las provincias fisiográficas de la Sierra Madre Occidental y la Mesa Central, y atraviesa a esta última provincia dividiéndola en los sectores: meridional y septentrional (Nieto-Samaniego *et al.*, 1997; Nieto-Samaniego *et al.*, 2005). A lo largo de este sistema de fallas se ubica el Campo Volcánico de Durango (Figura 1), compuesto por lavas basálticas con edades del Plioceno-Holoceno que están afectadas por fallas normales de rumbo NW (Aranda-Gómez *et al.*, 1997; Aranda-Gómez *et al.*, 2005) (Figura 1). Este sistema de fallas pasa por ciudades y poblaciones importantes como Santiago Papasquiaro, Durango, Fresnillo, Zacatecas, San Luis Potosí y San Luis de la Paz. A lo largo de este sistema de fallas se han identificado algunos tipos de riesgos socio-geológicos como: regiones con sismicidad reciente (Nieto-Samaniego *et al.*, 2012), escarpes de fallas con inestabilidad de laderas y fallas que controlan a deslizamientos por ejemplo en la ciudad de Zacatecas (Flores-

González, *et al.*, 2019). En la ciudad de Zacatecas también se han detectado que algunas de las fallas geológicas del SFSLT con direcciones NW-SE controlan la formación de grietas (fracturas) en construcciones urbanas como pavimentos, banquetas y bardas; estas fallas geológicas también ejercen un control en procesos erosivos y otros procesos geomorfológicos dentro de la ciudad (Escalona-Alcázar *et al.*, 2024).

Sistema de Cuencas y Sierras. El sistema de Cuencas y Sierras se extiende al norte de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) por todo el centro y el noroeste de México (Henry y Aranda-Gómez, 1992, 2000), y se caracteriza por fallas normales de rumbo NNE a NNW que generaron una topografía de fosas y pilares alargados como los que se observan al oeste y suroeste de la Mesa Central (Figura 1). A este sistema de fallas se le ha denominado el “*Basin and Range Mexicano*” (Henry y Aranda-Gómez, 1992) y afecta a la mayor parte de la provincia volcánica de la Sierra Madre Occidental y sus alrededores, salvo por su zona central que no presenta extensión significativa (Henry y Aranda-Gómez, 1992, 2000; Ferrari *et al.*, 2005). Según Henry y Aranda-Gómez (1992, 2000) el sistema de fallas de Cuencas y Sierras se formó por extensión de rumbo este-noreste en tres episodios: el primero, y el de menor intensidad, ocurrió alrededor de los 30 Ma, seguido por dos episodios de mayor intensidad uno en el límite Oligoceno-Mioceno y el otro en el Mioceno medio. A este sistema de fallas geológicas se asocia una fisiografía de sierras y cuencas, que determinan varios procesos geomorfológicos regionales y locales como deslizamientos, erosión de laderas y procesos de talud.

El Graben de Aguascalientes. Se ha considerado al Graben de Aguascalientes (Figura 1) como el límite tectónico entre las provincias fisiográficas de la Sierra Madre Occidental y la Mesa Central por tener un gran desplazamiento, y porque separa regiones con estilos estructurales distintos (Nieto-Samaniego *et al.*, 1999; 2023). Esta estructura regional tiene un rumbo preferencial N-S y como estructura buza hacia el este, con un escarpe de 250 m de altura que se continúa en cuencas rellenas por, al menos, 500 m de rocas sedimentarias con ignimbritas intercaladas. El graben de Aguascalientes controla la fisiografía del valle de

Aguascalientes, así como sus fallas geológicas (orientación N-S) controlan las fallas de subsidencia por extracción de agua subterránea y que afectan a la ciudad de Aguascalientes, y a poblados a lo largo de estas fallas (Pacheco-Martínez, *et al.*, 2013). Los riesgos sicionaturales asociados con estas fallas de subsidencia son varios como hundimientos de terreno, fracturamiento y deterioro de estructuras civiles, erosión intensa con formación de socavones en zonas urbanas, rompimiento de vías de comunicación y otros.

Sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende. El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende (SFTSMA) es un conjunto de fallas de rumbo N-NNW que atraviesan el centro de México y divide bloques corticales con diferentes historias geológicas, espesores de la corteza y topografía distintos, cuya principal manifestación geofísica es una anomalía gravimétrica significativa (Alaniz-Álvarez y Nieto-Samaniego, 2005b). Este sistema de fallas corta en su parte central a la FVTM, teniendo dentro de esta provincia un rumbo NNW, y al norte y sur de esta un rumbo N-S (Figuras 1 y 2). A lo largo de la ubicación de este sistema de fallas se originan varios tipos riesgos sicionaturales cuando cruzan por regiones pobladas, por ejemplo, en cuencas hidrológicas del noreste del estado de Guanajuato las fallas funcionan como canales del flujo de agua subterránea contaminada con arsénico y flúor (Piña-González *et al.*, 2022). A lo largo de la ubicación de estas fallas y en donde coinciden con la posición de fallas de subsidencia (originadas por la extracción desmedida de agua subterránea) se presenta un control estructural (Almazán-Vázquez, 2017; Angeles-Moreno *et al.*, 2021). En los escarpes de estas fallas del SFTSMA que coinciden con la ubicación de zonas pobladas, se presentan problemas de inestabilidades de laderas y taludes como en San Miguel de Allende, ciudad de Querétaro y en varias regiones del estado de México (Ordaz-Hernández *et al.*, 2019; Olivares-Sánchez, 2020).

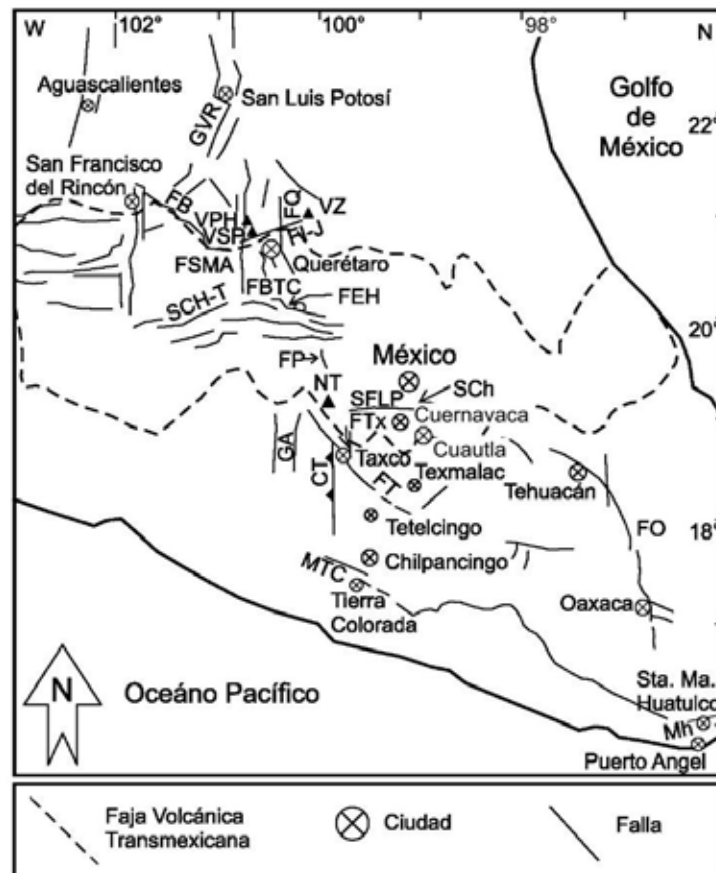


Figura 2. Fallas mayores dentro de la Faja Volcánica Transmexicana y Sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende. GVR: Graben de Villa de Reyes, FQ: falla Querétaro; FBTC: fallas Bartolomé, Tlacote, La Cuesta y Lagunillas-Huimilpan; FB: falla del Bajío; FI-J: fallas Ixtla-La Joya; FSMA: falla San Miguel de Allende; SCH-T: sistema Chapala-Tula; FT: falla Tetipac, Chichila y Amates; FLP: sistema de fallas La Pera; FTx: fallas Taxco, San Gregorio, Coapango y Acamixtla; FEH: falla Epitacio Huerta; FP: falla Perales; GA: graben de Arcelia; CT: cabalgadura Teloloapan; FO: Falla de Oaxaca; MTC: milonitas de Tierra Colorada; Mh: milonitas de Huatulco; SCh: Sierra de Chichinautzin; VZ: Volcán Zamorano; VPH: Volcán Palo Huérforo; VSP: Volcán San Pedro; NT: Volcán Nevado de Toluca.

Fuente: Alaniz-Álvarez y Nieto-Samaniego (2005b).

Sistemas de fallas de la Faja Volcánica Transmexicana. Se ha propuesto que la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) se ubica sobre una zona de debilidad preexistente de escala cortical o litosférica. La cubierta volcánica de hasta 4000 m de espesor no permite conocer si esta provincia se ubica sobre la traza de una falla cortical, pero dentro de esta provincia, o en sus límites, se encuentran fallas mayores con desplazamientos que van desde cientos a varios miles de metros (Figura 2). Los sistemas de fallas que se han reconocido son por lo menos cuatro, un sistema de fallas laterales NE-SW fallas del Mioceno tardío (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999), fallas extensionales NE-SW, fallas extensionales y oblicuas con rumbo E-W (Johnson y Harrison, 1990; Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999) y fallas NE-SW del Campo Volcánico Michoacán Guanajuato. Esta provincia geológica separa zonas de la corteza con estilos de deformación distintos, razón por la cual se considera a la FVTM como una frontera tectónica.

3. Metodología de estudio de fallas geológicas

En este trabajo las metodologías empleadas comprendieron la cartografía geológica, interpretación de imágenes de satélite de Google Earth, geología de campo, geomorfología y geología estructural. En el caso de San Miguel de Allende (estado de Guanajuato) se establece una relación entre la cartografía geológica con los efectos que las fallas geológicas provocan en las poblaciones, identificando varios peligros y riesgos socionaturales como contaminación de agua subterráneas, control estructural en grietas en la superficie o inestabilidad de laderas. En las fallas de subsidencia de la Cuenca del Valle de Toluca (CVT) se emplearon cartografía de campo y método de observación de afectaciones a construcciones urbanas. En el caso de peligros y riesgos socionaturales en el Volcán San Antonio (ubicado al noroeste del volcán Nevado de Toluca), se realiza una integración de fallas geológicas, se relaciona a la cartografía geomorfológica y se realizan verificaciones en campo. En el último caso presentado del análisis de las fallas geológicas que se activaron durante el terremoto de 19 de septiembre de 2017 en la región de Tenancingo (estado de México) se emplearon las metodologías de cartografía geológica con interpretación de

lineamientos en imágenes de satélite, trabajo de campo y documentación de campo de los daños en construcciones por el sismo.

Las fallas geológicas pueden ser identificadas en imágenes satelitales o directamente en la superficie durante el trabajo de campo. Los datos se colectaron mediante observaciones y mediciones de la orientación y la inclinación de los planos de falla con instrumentos como brújulas y clinómetros (Fossen, 2016). Ya que se colectaron suficientes datos de planos de falla, se realizó el análisis estructural. El tipo de análisis estará en función de los objetivos del estudio. Los datos deben ser agrupados y seleccionados de una manera que resulte razonable (Fossen, 2016). En algunos casos estos pueden ser homogéneos y son tratados como una familia o sistema, otras veces son heterogéneos y será útil subdividirlos en subgrupos o subpoblaciones. Se deben considerar criterios geológicos para subdividirlos o agruparlos, como la orientación, si existe o no un relleno, tipo de movimiento o por zonas dentro del área de estudio. Estas últimas, las variaciones geográficas definen subzonas que suelen llamarse dominios estructurales.

4. Resultados y discusión

4.1. Falla San Miguel de Allende

Características geológicas

La Falla San Miguel de Allende es parte del Sistema de Fallas Taxco-San Miguel de Allende, ha sido reconocida en noreste del estado de Guanajuato afectando a toda la Cuenca Alta del Río Laja (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001; Beltrán-Martínez *et al.*, 2023). Considerando todos sus segmentos, tiene un rumbo promedio NNW-SSE, con variaciones a N-S y NNE-SSW en algunos segmentos, y una longitud total aproximada de 50 km (Figura 3). El sector central de la Falla de San Miguel de Allende resulta el de mayor relevancia desde la óptica de peligros y riesgos socionaturales, pues en el bloque hundido de esta falla se ubica gran parte de la mancha urbana de la población homónima (Figura 3). La posición de la falla para el sector central se ha reconocido desde el sur de la ciudad hasta 15 km al norte de San Miguel

de Allende; en la parte sur la falla es cubierta por los depósitos del volcán Palo Huérfano, y continúa con un rumbo NNE hacia el norte de la ciudad. La falla de San Miguel de Allende es una falla de tipo normal con inclinación hacia el oeste y que se formó en el Oligoceno; la falla presenta reactivaciones durante el Mioceno, a la que se le ha estimado un desplazamiento máximo de 450 m (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001) produciendo desniveles topográficos que superan los 200 m al norte de la ciudad de San Miguel de Allende. En el bloque levantado de esta falla se exponen rocas Mesozoicas marinas compuestas de intercalaciones de lutitas, areniscas y calizas, que son cubiertas por rocas volcánicas cenozoicas como basaltos, riolitas e ignimbritas (Figura 3). Al oeste de la falla, en el bloque hundido, hay afloramientos aislados de basaltos, y predomina el relleno sedimentario mal consolidado como limos, areniscas y conglomerados, cuyo espesor máximo es de hasta 200 m (Beltrán-Martínez *et al.*, 2023; Beltrán-Martínez, 2023).

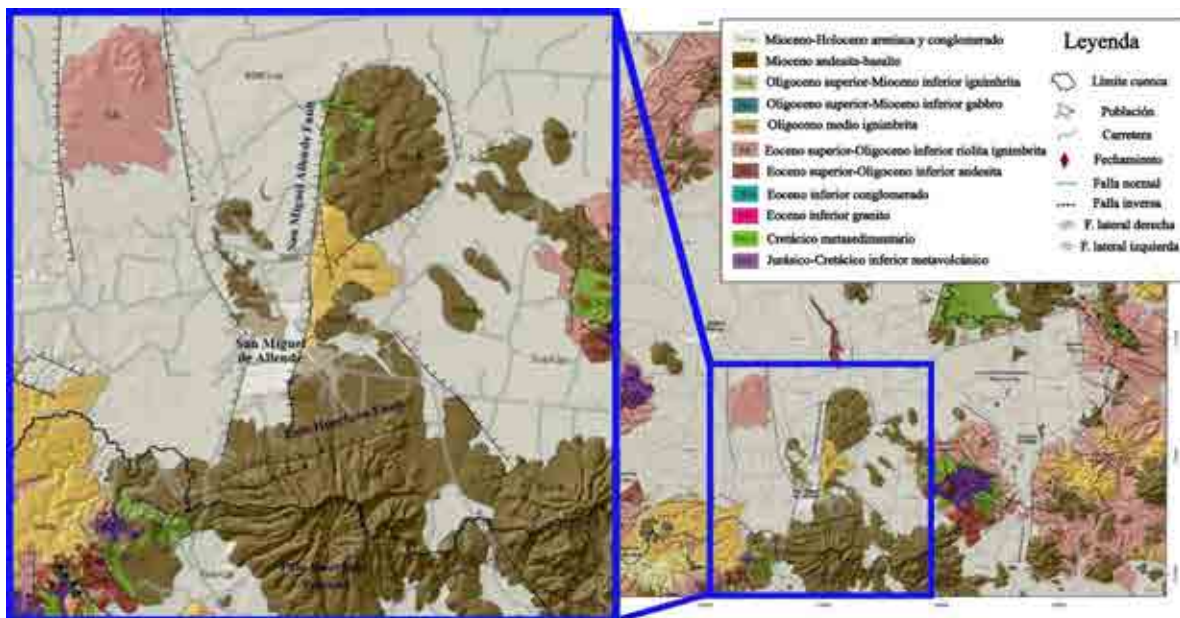


Figura 3. Fragmento del mapa geológico de la Cuenca Alta del Río Laja. En el recuadro azul se muestra un acercamiento al área del sector central de la Falla de San Miguel de Allende.

Fuente: Beltrán-Martínez *et al.* (2023)

Peligros y riesgos socionaturales

El crecimiento poblacional y la actividad agrícola han llevado a la sobreexplotación del acuífero, alterando el equilibrio ambiental e incrementando la presencia de contaminantes de origen geogénico en el agua subterránea debido a la extracción de agua a mayores profundidades en algunas partes de la cuenca (Knappett *et al.*, 2020). Se ha propuesto que las fallas en la cuenca, como la de San Miguel de Allende, tienen un rol importante en el ascenso de contaminantes aunado a la explotación del acuífero (Piña-González *et al.*, 2022). De continuarse con la tasa de extracción del agua subterránea para consumo humano y uso agrícola existe el riesgo de que la presencia de contaminantes se generalice en la Cuenca Alta del Río Laja (CARL).

Los hundimientos y agrietamientos del terreno que son causados por la sobreexplotación de acuíferos en cuencas como la CARL son otro fenómeno geológico que representa un riesgo para la población y la infraestructura. Al norte de San Miguel de Allende, siguiendo la traza de la falla, se encuentra la comunidad de San José de la Estacada, Municipio de Dolores Hidalgo; en esta comunidad, hundimientos de hasta dos metros han acompañado la formación de grietas en el terreno con orientación NNW-SSE a NW-SE causando afectaciones a las instalaciones de la escuela de educación básica. El fenómeno de hundimiento y agrietamiento asociado a la sobreexplotación se ha documentado en otras partes del centro de México como el valle de Aguascalientes, en donde la presencia y orientación de los agrietamientos está fuertemente influenciado por fallas mayores (Pacheco-Martínez *et al.*, 2013). Los fenómenos de hundimientos y agrietamientos no se han reportado en otras áreas de la Cuenca Alta del Río Laja (CARL), pero de continuarse la sobreexplotación de agua subterránea existe el riesgo de formación de nuevos hundimientos y agrietamientos y la presencia de contaminantes en el agua subterránea. Las fallas mayores, como la falla de San Miguel de Allende, ejercerán un control importante en las orientaciones de los agrietamientos, y de darse estos en la mancha urbana de la

población homónima traerá afectaciones a la infraestructura urbana y casa habitación de la población homónima.

4.2. Fallas de subsidencia en la Cuenca del Valle de Toluca

La formación de fallas de subsidencia hídrica es una consecuencia de la deformación del terreno por extracción de agua subterránea, es un problema reconocido a nivel internacional y a nivel nacional (México) ligado con el crecimiento poblacional y por ende la demanda de agua (Figueroa-Miranda *et al.*, 2018; Collados-Lara *et al.*, 2020). La subsidencia del terreno y formación de fallas con grietas no solo ocurre en ciudades, sino también en zonas agrícolas. En zonas agrícolas de escalas de tamaño regionales la extracción de agua subterránea origina compactación de los materiales geológicos del acuífero como se puede ejemplificar con el caso del Valle Central de California (Faunt *et al.*, 2015), y también en la región de El Bajío en el estado de Guanajuato (Rodríguez *et al.*, 2012; Figueroa-Miranda *et al.*, 2018). En las ciudades que tienen el problema, la subsidencia del terreno es acompañada por la formación de grietas y fallas de subsidencia en el suelo que afecta a construcciones civiles como casas habitación, residencias, bodegas industriales y otros tipos de infraestructura civil. En México varias ciudades están en esta situación ya que crecen rápidamente en su número de habitantes y se urbanizan rápidamente lo que demanda una extracción desmesurada del agua subterránea. Una gran cantidad de estas ciudades se encuentran en cuencas volcano-sedimentarias que son limitadas por fallas geológicas que son denominadas semigrabenos o grabenes. Algunos ejemplos de estas ciudades ubicadas en cuencas volcano-sedimentarias con problemas de subsidencia son: Ciudad de México, Aguascalientes, Morelia, Celaya, Irapuato, Querétaro, y Toluca. Las fallas por subsidencia en estas ciudades se han reportado en varios estudios, por ejemplo: Garduño-Monroy *et al.*, 2001; Pacheco-Martínez *et al.*, 2013; Ochoa-González *et al.*, 2018; Almazán Vázquez, 2017; Rodríguez-Campero *et al.*, 2023).

La Cuenca del Valle de Toluca está limitada por sierras de origen volcánico, estas sierras presentan varias estructuras volcánicas que tuvieron actividad desde el Mioceno llegando al Cuaternario por ejemplo la Sierra de las Cruces y la Sierra Nevado de Toluca-San Antonio (García-Palomo *et al.*, 2008, 2000). Los sistemas de fallas geológicas alrededor de la Cuenca del Valle de Toluca tienen direcciones NW-SE, E-W, y NE-SW (Figura 4) (Sistemas de Taxco-San Miguel de Allende, Sistemas de fallas de Acambay y Tenango, y Sierra de las Cruces). Se interpreta que parte de estas fallas geológicas deben estar ocultas en la ZMVT, esto por la alineación de aparatos volcánicos, las trazas de las fallas de subsidencia y alineación de terremotos que han ocurrido (Almazán Vázquez, 2017; Angeles-Moreno *et al.*, 2021).

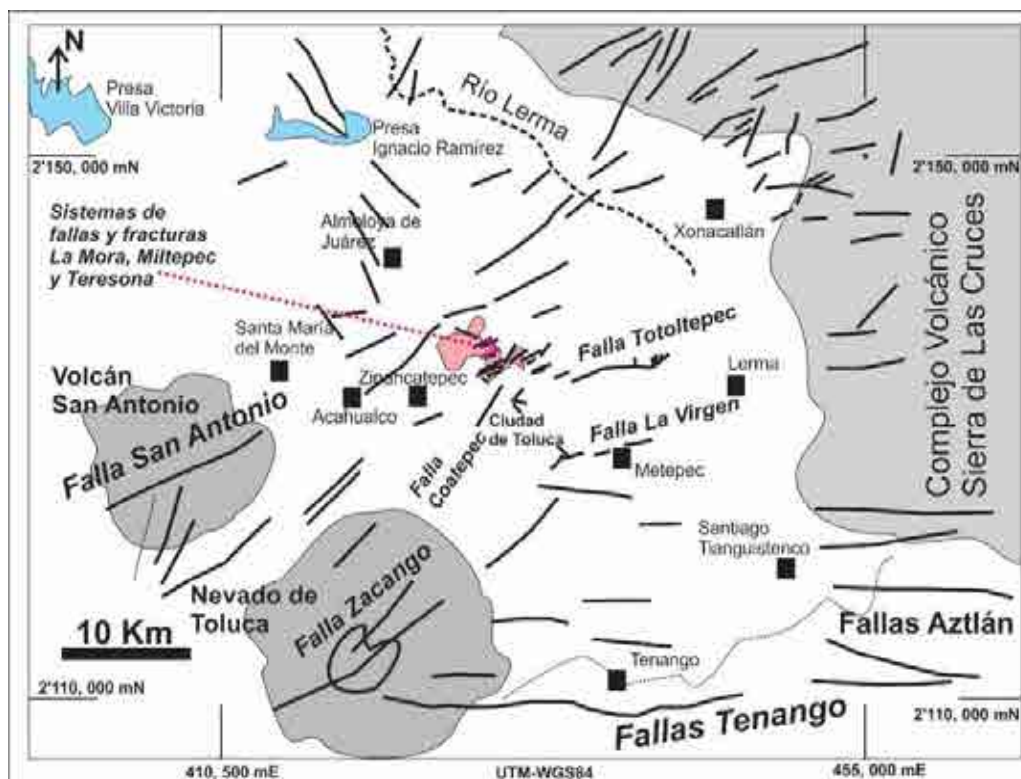
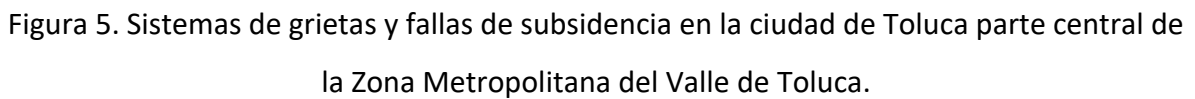


Figura 4. Ubicación de los sistemas de fallas geológicas que se localizan en la Cuenca del Valle de Toluca en relación con los sistemas de fallas de subsidencia hídrica en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT).

Fuente: Angeles-Moreno *et al.* (2021).

Características físicas y geológicas

Las fallas de subsidencia en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) se han estudiado en sus características de orientación de su traza, abertura, profundidad y localización por compañías subcontratistas de organismos operadores de agua desde los años ochenta (CONAGUA, 2002) sin embargo estos estudios no están publicados. Los sistemas de fallas de subsidencia reconocidos son falla Totoltepec, La Virgen-Magdalena, La Mora, Miltepec, Lerdo, Cerro del Calvario, Coatepec, Teresona y Sierra Morelos (Figura 5). Estos sistemas de fallas se reconocieron con base cartografía de campo y detección de daños en las construcciones civiles. Las fallas presentan direcciones E-W, ENE-WSW, ESE-WNW, NW-SE y N-S con geometrías curvilíneas, sigmoidales, zonas de relevo, escalonadas, ramificadas, y cola de caballo (Figura 6) (Almazán Vázquez, 2017; Angeles-Moreno *et al.*, 2021). Las longitudes son variables de escala kilométrica como la falla Totoltepec que tiene longitudes mínimas de 1 a 2 km, llegando a alcanzar 8 km y otras fallas de subsidencia de 100 m a 1 km (Figura 5). Las fallas cortan a estratos de suelos de origen volcánico, capas de rocas piroclásticas y otras rocas volcánicas. Las rocas piroclásticas fueron derivadas de depósitos piroclásticos de composición andesítica originados por flujos piroclásticos, oleadas piroclásticas y depósitos de caída; estos depósitos a su vez provenientes de las estructuras volcánicas de los alrededores de la ZMVT.



213



Figura 6. Geometría de grietas y fallas de subsidencia en construcciones afectadas. A, estructura sigmoideal definida por grietas y desplazamiento vertical de falla de subsidencia. B, falla de subsidencia con desplazamiento vertical, grietas de tensión ramificadas en aceras y bardas de construcción. C, construcción intensamente fracturada en zona de fallas de subsidencia de Oxtotitlán. D, fallas inversas de subsidencia en muro de construcción resultado de acomodo estructural de falla principal Totoltepec de subsidencia.

Fuente: Elaboración propia.

Mecanismos de subsidencia y generación de grietas

Las fallas de subsidencia en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) se han reconocido desde los años sesenta y setentas como se reporta en varios reportes técnicos

no publicados (CONAGUA, 2002). La formación de estas fallas de subsidencia y grietas tienen que ver con varios factores que se combinan: como la exportación del agua hacia la Ciudad de México mediante el Sistema Lerma-Cutzamala que entro en operación a principios de la década de 1950 (CONAGUA, 2005), el uso agrícola e industrial del agua subterránea, los abatimientos de niveles freáticos, profundización de conos de abatimientos alrededor de pozos de agua (Rodríguez-Campero, *et al.*, 2023), y compactación de los materiales de los acuíferos.

La generación de grietas y fallas de subsidencia ocurre en varias zonas específicas de la ZMVT, en zonas de transición entre roca de derrames volcánicos dacítico-andesíticos con los suelos y depósitos piroclásticos de las partes bajas, en las capas superiores de fallas de bordes de grabenes, y en las protusiones o levantamientos topográficos de rocas volcánicas de basamento (Figura 7). Las fallas y grietas de los sistemas Oxtotitlán, Miltepec, y la Mora son ejemplos de sistemas ubicados en las zonas de transición entre diferentes materiales litológicos y cambios de espesor de las rocas volcánicas (Figura 5). En estas zonas han ocurrido descensos piezométricos importantes en el agua subterránea lo que implica otro factor importante que se suma a la formación de grietas en las zonas transicionales (Rodríguez-Campero *et al.*, 2023). La falla de subsidencia Totoltepec se ha interpretado que coincide en posición y dirección a largo de una falla geológica que se encuentra a mayor profundidad y que es parte de un graben oculto (Almazán Vázquez, 2017, Angeles-Moreno *et al.*, 2021) y otros trabajos sugieren que puede deberse a la presencia de rocas volcánicas de mayor resistencia mecánica a profundidad por irregularidades topográficas (Rodríguez-Campero *et al.*, 2023).

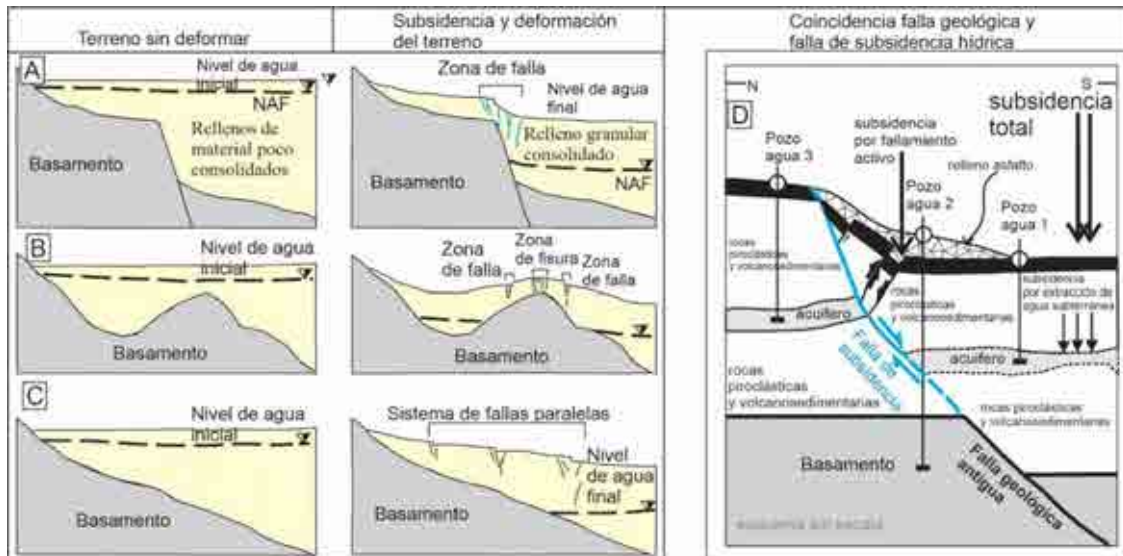


Figura 7. Algunos mecanismos en el origen de las grietas y fallas de subsidencia. A, falla geológica del borde un graben que es coincidente espacialmente con las fallas de subsidencia originadas por deslizamiento de nivel freático (NAF). B, altos y bajos en el basamento, y en zona de protusión de basamento se formas grietas de subsidencia al cambiar el nivel freático. C, fallas y grietas de subsidencia en la margen de cuenca o zona transicional mecánica y de cambios de espesor de depósitos de cuenca. D, esquema que muestra el modelo de mecanismo de subsidencia cuando coincide una falla de subsidencia hídrica y a profundidad una falla geológica.

Fuente: los esquemas A, B, y C fueron modificados de Pacheco-Martínez *et al.* (2013) y el esquema D es elaboración propia.

Peligros y riesgos socionaturales

Los principales daños generados por la formación de las fallas de subsidencia y grietas asociadas en la ZMVT son en los elementos constructivos de viviendas familiares, edificios, naves industriales, avenidas, calles, banquetas y otros elementos de construcción en las calles. Las deformaciones en las construcciones comprenden desplazamientos, rotaciones y distorsiones de cimentaciones, muros, columnas, trabes, ventanas, puertas, lozas y pisos

(Figura 6). Esto ya se ha descrito en varios trabajos realizados con anterioridad que estudian las fallas de subsidencia en la ZMVT (Almazán Vázquez, 2017; Angeles-Moreno *et al.*, 2021; Rodríguez-Campero *et al.*, 2023). Los riesgos socionaturales que pueden ocurrir son debido a la vulnerabilidad que presentan las construcciones a lo largo de la zona de influencia y de la traza en si misma de la deformación de las fallas y grietas de subsidencia, en donde se ha observado que las construcciones varían en tipos de materiales de construcción desde adobe, tierra y concreto, y todos estos tipos de construcciones son afectados (Figura 6). La calidad de vida de las familias es afectada cuando sus casas se encuentran sobre una falla de subsidencia, ya que el movimiento de la falla daña la construcción provocando intenso fracturamiento y hundimiento diferencial; en consecuencia, una mayoría de familias no puede sobreponerse a estos gastos de reparaciones, ya que también es un gasto continuo y muchas familias requieren reubicarse, lo que implica que también es un problema de ordenamiento territorial.

La presencia de fallas y grietas de subsidencia hídrica son una evidencia de la sobreexplotación de los acuíferos en la ZMVT que va acompañada de procesos sociales como el crecimiento de la población, la expansión no planificada de la urbanización y la conciencia de los habitantes ante el problema del agrietamiento. Estos factores aumentan el riesgo como lo apunta Baró Suárez *et al.* (2018). En la periferia de la zona urbanizada (zonas transicionales) se pueden presentar varios tipos de riesgos como son sísmicos y un fracturamiento intensificado. Estos riesgos están vinculados con la heterogeneidad en la estratigrafía, la presencia de protusiones topográficas en el basamento y presencia de pozos de agua donde hay fallas y grietas (Figura 7). Las zonas transicionales presentan una alta vulnerabilidad ante los eventos de terremotos, ya que al ocurrir un terremoto se generan y activan fracturamientos, lo que tiene consecuencias lamentables en las construcciones y posibles daños a vidas humanas; esto se ha visto en la Cuenca del Valle de México con el sismo de 19 de septiembre de 2017 en donde el terremoto afectó zonas periféricas de la Cuenca del Valle con daño a construcciones y personas (Torres-Álvarez, 2017-2018) y activo

fallas y grietas de subsidencia por ser zonas de debilidad y con espesores de capas de rocas blandas menores a 30 m.

Otros tipos de riesgos asociados con la formación de grietas y fallas de subsidencia que son una consecuencia de la sobreexplotación de los acuíferos del Valle de Toluca son los riesgos ambientales y ecológicos, esto ya había sido señalado en el trabajo de Esteller y Diaz-Salgado (2002). En este trabajo se señala de la desecación de cuerpos de agua, disminución de niveles de agua en ríos y la subsidencia. La subsidencia implica la generación de fallas de subsidencia y estas fallas acompañadas de formación de grietas tienen extensión a profundidad lo que origina conexiones entre acuíferos, las conexiones de acuíferos o niveles de agua subterránea añade otro elemento de riesgo en este caso por contaminación de acuíferos y que puede afectar a la población, esto porque las conexiones de grietas de subsidencia pueden llegar a los niveles de aguas residuales o niveles más profundos con presencia de metales pesados tóxicos; en la ciudad de Irapuato, por ejemplo, se ha visto que existe contaminación del agua subterránea con tolueno y se ha interpretado que las fallas subsidencia facilitan la migración de contaminantes (Rodríguez *et al.*, 2012). En algunos pozos de la región de El Bajío se han reportado pozos de agua con concentraciones altas de arsénico y flúor (Mendoza, 1999) lo que es otro riesgo socioambiental y estos contaminantes pueden trasladarse a lo largo de las fallas de subsidencia. Las fallas y grietas de subsidencia hídrica no se han considerado como un riesgo en las leyes y reglamentos ambientales por ejemplo Ley General de Aguas Nacionales o Leyes que tienen que ver con Equilibrio Ecológico o Protección de Medio Ambiente, y esto ya se había señalado por ejemplo en el trabajo de Rodríguez-Castillo y Rodríguez-Velázquez (2006) donde también se señala que existe una desvinculación total de los trabajos de cartografía de grietas de Protección Civil y no se consideran por constructores de unidades habitacionales. En la actualidad en las Ciudades de México y Aguascalientes ya existe una mayor preocupación por parte de gobiernos estatales y municipales que es reflejado en la realización de estudios de ingeniería civil, de ingeniería geotécnica y de geociencias. En algunos gobiernos también

se ha colocado a disposición pública la información de la ubicación y distribución espacial de las fallas y grietas de subsidencia en estas ciudades. por ejemplo, en Aguascalientes el Sistema de Información de Fallas Geológicas y Grietas (SIFAGG) (SOP, 2009), esto debe llevarse a los planes de desarrollo urbano, municipal y de ordenamiento territorial.

4.3. Características geológicas y peligros asociados en el Volcán San Antonio

Estratigrafía

El volcán San Antonio se ubica al noroeste del volcán Nevado de Toluca (Figura 8), forma parte del complejo volcánico Nevado de Toluca-San Antonio, y del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca. García Palomo, *et al.*, (2000), mencionan que, por su estratigrafía, la morfología del edificio volcánico, el fracturamiento y las rocas intemperizadas, su edad pertenece a Mioceno medio. Se definió una unidad estratigráfica denominada Secuencia volcánica San Antonio, el edificio principal está conformado por secuencias de flujos de lava cubiertas por materiales piroclásticos que consisten en capas gruesas de caída, ricas en pómez que están sobrepuestas por depósitos de flujos piroclásticos pumíticos y *surges*. Secuencias de depósitos gruesos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas expuestos en la ladera norte del volcán, cerca de la localidad de Santa María del Monte municipio de Zinacantepec, México García Palomo *et al* (2000).

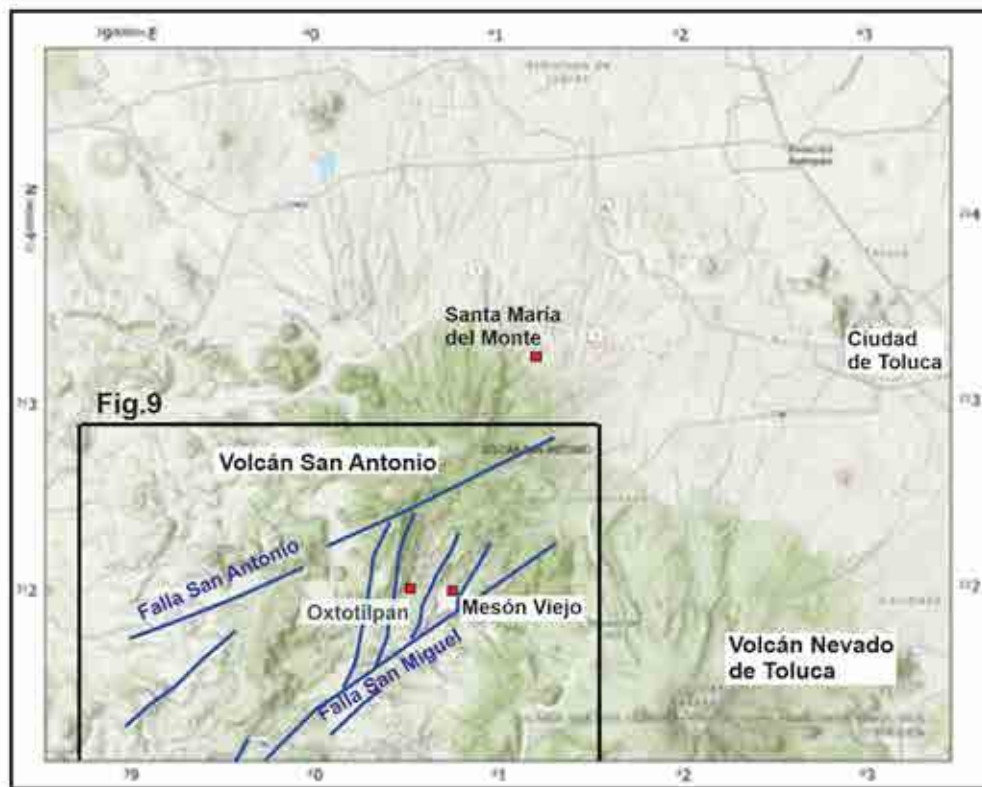


Figura 8. Mapa de ubicación del volcán San Antonio.

Fuente: ESRI, NASA, NGA, USGS, CONANP, Tom Tom, Garmin, Foursquare, METI/NASA, USGS, EPA y USDA.

Fallas

El volcán San Antonio está asociado a la intersección de dos sistemas de fallas normales con dirección noreste-suroeste, se extienden desde la zona de Zihuatanejo-Petatlán hasta el norte de la cuenca de México, en algunos sitios del volcán presenta una morfología de laderas escarpadas con pendientes superiores a los 30°. Los escarpes coinciden con fallas que se formaron desde el Mioceno y se reactivaron durante el Plioceno. Estos sistemas de fallas está conformados por las fallas San Antonio y San Miguel, la primera tiene una longitud de aproximadamente 24 km en el volcán San Antonio, y corta la parte central del edificio volcánico; las segunda falla se ubica al sureste de la primera, entre el los volcanes

Nevado de Toluca y San Antonio, la presencia de esas dos fallas normales forman un valle denominado como una fosa tectónica San Miguel (García Palomo *et al.*, 2000), tiene una dirección hacia el sur, con una profundidad de aproximadamente 400 metros, y una anchura de 3 km, y es drenado por el río Peña Blanca (Figura 9).



Figura 9. Fallas volcán San Antonio.

Fuente: García Palomo *et al.* (2000).

Geomorfología

El volcán San Antonio se eleva de los 2550 a 3680 msnm, presenta una cima en forma de herradura hacia el sur, su ladera norte es un piedemonte suavizado con pendientes de 2° a 15°, está conformado por depósitos volcánicos (flujos piroclásticos de bloques y cenizas y pómez) (García-Palomo *et al.*, 2000). Las laderas son disectadas por corrientes fluviales que

forman barrancos con una profundidad promedio de 100 a 150 metros, la ladera sur se caracteriza por un piedemonte con mayor pendiente de entre 15° a más de 35°, conformado por lavas de composición andesítica, es una piedemonte fuertemente erosionado con profundos valles fluviales de 200 a 400 metros, destaca el valle fluvial del río Peña Blanca en la localidad de San Francisco Oxtotilpan, con una dirección hacia el sur con una anchura máxima de 4 km, con una profundidad promedio de 400 m y una longitud de 11 km que forma parte de la fosa tectónica de San Miguel.

Peligros y riesgos socionaturales

Los flujos de detritos son los movimientos de remoción en masa más peligrosos en las zonas montañosas, debido a las altas velocidades y distancias que alcanzan, así como los daños que ocasionan (Hürlimann, *et al.*, 2019, Spielmann y Aaron, 2024). Este tipo de movimientos tienen un particular mecanismo de generación inician primero como deslizamiento superficial, a nivel de suelo, y posteriormente, se combinan con los escurrimientos de poca permeabilidad durante la presencia de lluvias intensas (Xia, *et al.*, 2023). Los flujos de detritos aportan grandes cantidades de sedimentos con tamaños que van desde arcillas hasta cantos rodados y cuando se depositan en los abanicos aluviales están mal clasificados (Ballesteros-Cánovas, *et al.*, 2023). Los factores que influyen en la generación están asociados a las intensas lluvias, pero existen otros que forman parte de la estabilidad de la ladera, como puede ser la litología, pendiente, morfología y la presencia de fallas y fracturas. Las fallas tienen una influencia fundamental en la estabilidad de las pendientes, el control de la erosión y transporte de sedimentos en las laderas (Wei, *et al.*, 2018; Wang, *et al.*, 2020, Whitbread, *et al.*, 2024).

La presencia del sistema de fallas San Miguel y San Antonio y fracturas, asociados a una morfología caracterizada por escarpes en la cima del volcán, presencia de rocas muy intemperizadas, depósitos de cenizas y flujos piroclásticos poco consolidados, además de las condiciones de precipitación de la zona, que es de 1,000 a 1,200 mm promedio anual, han favorecido el desarrollo de procesos de remoción en masa. En este sentido, destacan

los eventos ocurridos en el año 2010, fueron eventos complejos que comenzaron como deslizamientos superficiales y con la combinación con el agua se convirtieron en flujos detritos, estos eventos tuvieron lugar algunas localidades del estado de México como Mesón Viejo y San Francisco Oxtotilpan en el municipio de Temascaltepec, y en la localidad de Santa María del Monte en el municipio de Zinacantepec. Los eventos ocurridos en Mesón Viejo y San Francisco Oxtotilpan, fueron de gran impacto debido a las afectaciones principalmente en la carretera Toluca-Valle de Bravo y en las áreas agrícolas de estas localidades, provocando pérdidas económicas. Los movimientos ocurridos en la localidad de Mesón Viejo iniciaron con un primer flujo de detritos en el escarpe de un sector de la falla San Antonio, con una altura de aproximadamente 50 metros. Este escarpe caracterizado por lavas andesíticas muy intemperizadas. El flujo de detritos posteriormente se desplazó por el cauce del río Zacatonal, provocando una mezcla de agua, rocas, detritos, sedimentos finos y árboles, moviéndose en una pendiente de aproximadamente 30°, la velocidad y la carga se incrementó al llegar a la carretera Toluca-México, debido a que el río está canalizado por un puente mismo que fue azolvado y cubrió la carretera llevándose algunos vehículos que transitaban por ella. Un segundo flujo de detritos, que es más importante, se originó al sureste del anterior, uniéndose al río Zacatonal, aumentado su volumen y depositándose en el abanico aluvial del río, donde se asienta la localidad de Mesón Viejo, donde inundó caminos y áreas de cultivo (Figura 10).

En la localidad de San Francisco Oxtotilpan, los movimientos ocurridos se presentaron en laderas escarpadas asociada con la falla San Antonio, correspondiente al sector oeste del graben San Miguel, las condiciones litológicas, estructurales, geomorfológicas y de precipitación fueron similares a la zona de Mesón Viejo. La generación del movimiento se presentó en un afluente del río Peña Blanca, sobre una ladera escarpada, su inicio de desarrollo fue como un deslizamiento superficial y posteriormente se mezcló con agua, sedimentos y árboles convirtiéndose en un flujo de detritos, uniéndose al canal del río Peña

Blanca y depositándose en el abanico aluvial del mismo, inundado las zonas de cultivo (Figura 11).

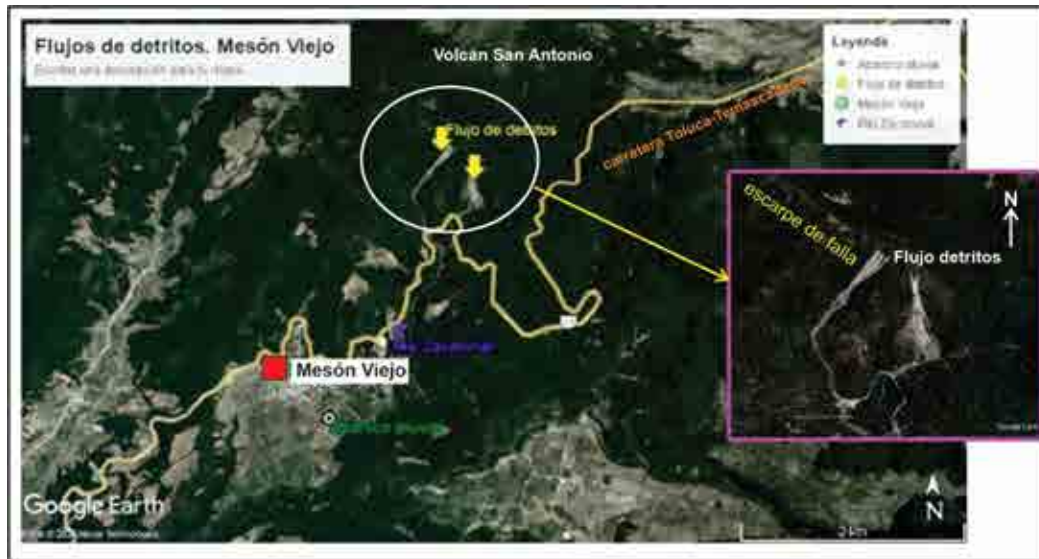


Figura 10. Ubicación de los flujos de detritos en la localidad de Mesón Viejo.

Fuente: Imagen Google Earth.



Figura 11. Ubicación de los flujos de detritos en la localidad de San Francisco Oxtotilpan.

Fuente: Google Earth.

Finalmente, en la ladera norte del volcán San Antonio, sobre el piedemonte se presentó un movimiento similar a los anteriores, se originó en un canal de cauce, sobre depósitos de ceniza y pómez, este movimiento no causó daños en el área, debido a que fue de escasa extensión (aproximadamente 400 m), abarcando solo área de bosque (Figura 12).



Figura 12. Ubicación de los flujos de detritos en la localidad de Santa María del Monte.

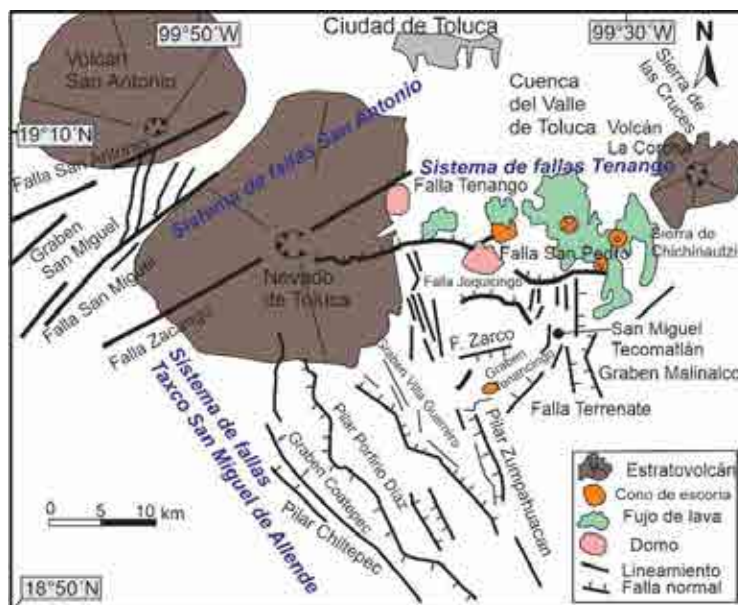
Fuente: Google Earth.

4.4. Sistema de fallas de Tenango

Características geológicas

El sistema de fallas de Tenango (SFT) es un sistema de fallas y fracturas que se localizan y son un límite importante fisiográfico, geomorfológico, e hidrológico de la Cuenca del Valle de Toluca en su parte Sur. Las fallas tienen una dirección principal E-W con otras fallas de acomodo estructural con direcciones NE-SW, N-S y WNW-ESE. A lo largo de la traza de las fallas que lo componen se localiza en el estratovolcán Nevado de Toluca (Figura 13). El SFT es un sistema de fallas que pertenece a la Faja Volcánica Transmexicana y coincide espacialmente con el Complejo Volcánico Chichinautzin del Cuaternario. El SFT está formado por el graben Tenancingo, pilar estructural Atlatlahuaca, y las fallas: Tenango,

En la parte poniente del SFT se localiza otro sistema de fallas NE-SW que es definido por las fallas Zacango y falla San Antonio (García-Palomo *et al.*, 2000). En la parte sur del SFT se localizan varios sistemas de fallas que tienen direcciones N-S, NW-SE y NE-SW (Figura 13), estas fallas definen depresiones estructurales (grabenes), semigrabenes y pilares estructurales (García-Palomo *et al.*, 2000). Los sistemas de grabenes NW-SE son parte del Sistema de Fallas de Taxco San Miguel de Allende que tiene fallas más antiguas al Sistema de Fallas de Tenango (SFT).



Fuente: figura modificada de García-Palomo *et al.* (2000).

Peligros y riesgos socionaturales

La presencia, localización y las características geológicas de las fallas del Sistema de Fallas de Tenango son consideradas con una zona de peligro y riesgos sísmico para las poblaciones cercanas y también para la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT). Existen evidencias de actividad sísmica a lo largo de las fallas E-W, por ejemplo, en lo denominado fallas de Aztlán que son un sistema de fallas que limitan a la Cuenca del valle de México en su parte Sur (Campos-Enríquez *et al.*, 2015), y en donde se localiza parte del Campo Volcánico Monogenético de Chichinautzin (CVCh). El Sistema de Fallas de Tenango (SFT) presenta históricamente actividad sismogénica, ya que Norini *et al.* (2006) muestra que ocurrieron dos eventos de fallamiento, el primer evento de fallamiento ocurrió entre 10, 585 años y 6045 años y el segundo de menos de 6000 años, esto con base en fechamientos geocronológicos de secuencias piroclásticas y depósitos epiclásticos que fueron desplazados verticalmente por las fallas de Tenango. Otro evento sísmico registrado ocurrió como tipo enjambre sísmico entre el 18 al 31 de agosto de 1980, con 29 temblores en el rango de 2.2 a 3.5 de magnitud (M_L) (Yamamoto y Mota, 1988); este evento lo vuelven a analizar Campos-Enríquez *et al.* (2015) considerando que fueron magnitudes de 2.7 a 3.5 M_c con una orientación E-W, y determinando que las fallas que se activaron son continuidad del sistema de fallas de Aztlán en la Sierra de Chichinautzin. La Cuenca del Valle de Toluca se ha considerado vulnerable ante la actividad del SFT esto debido los depósitos sedimentarios de origen lacustre en la estratigrafía de la cuenca (Norini *et al.*, 2006; Olivares Sánchez, 2020). Se han realizado estudios de vulnerabilidad y análisis de efectos de sitio en la ciudad de Toluca ante la posible afectación de un terremoto (Ordaz Hernández *et al.*, 2020).

En el terremoto de 19 de septiembre de 2017 varios poblados de los municipios ubicados en la parte sur del Estado de México fueron afectados. Las zonas más afectadas fueron aquellas ubicadas en la región de influencia del Sistema de Fallas de Tenango en su parte Norte y parte Sur. Los daños en las construcciones fueron variados desde fracturamiento

parcial hasta colapso total de las estructuras habitacionales (Figura 14) y estos daños estuvieron ligados con la dirección de la activación de fallas geológicas, así como condiciones geotécnicas del terreno (Angeles-Moreno, *et al.*, 2021). La organización de las brigadas de apoyo enseguida del terremoto estuvo organizada por delegados y vecinos de las poblaciones afectadas como el caso de San Miguel Tecamatlán en el municipio de Tenancingo en sur del estado de México (Figura 14), se observó la solidaridad entre personas de la comunidad y también en la llegada de ayuda externa de parte de organizaciones civiles, instituciones educativas, comunidades vecinas, y más tarde del municipio. Se observó al final la necesidad de contar con planes de contingencia a escala local y planes de acción en relación con la gestión del riesgo, y lo adecuado de contar con sistemas de alerta temprana ante terremotos y brigadas preparadas para la acción ante el riesgo sísmico.



Figura 14. Daños a construcciones por el terremoto de 19 de septiembre de 2017. A, casa dañada por terremoto en San Miguel Tecamatlán, municipio de Tenancingo. B, organización, acción comunitaria y de apoyo externo en San Miguel Tecamatlán enseguida de sismo de 19 de septiembre de 2017. C, medición de grietas de extensión en zonas propensas a deslizamiento por terremoto. D, efectos del terremoto en casas de San Miguel Tecamatlán.

Fuente: elaboración propia.

5. Conclusiones

Los sistemas de fallas geológicas del centro-sur de México (Sistema de Fallas San Luis Tepehuanes, fallas de Sierras y Cuencas (*Basin and Range*), fallas de Taxco San Miguel de Allende (SFTSMA) y fallas de la Faja Volcánica Transmexicana) tienen un papel importante cuando se localizan en poblaciones y ciudades, ya que definen directa o indirectamente riesgos socionaturales y socio-geológicos, como la influencia de las fallas geológicas en la contaminación del agua subterránea por arsénico y flúor en cuencas hidrológicas, controles en flujos de detritos a lo largo de las fallas San Antonio y San Miguel, controles estructurales en las fallas de subsidencia hídrica en Toluca, y por último la presencia de terremotos en fallas geológicas sísmicamente activas como el sistema de fallas de Tenango. Los planes de gestión de riesgo en las comunidades deben considerar la ubicación y la naturaleza de estos sistemas de fallas geológicas.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen las observaciones realizadas por los investigadores revisores y a los editores de la revista que ayudaron a mejorar el manuscrito.

Conflictos de intereses

Los autores de este trabajo declaran no tener conflicto de interés.

Referencias

Alaniz-Álvarez, S.A. y Nieto-Samaniego, A.F. (2005b). El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende y la Faja Volcánica Transmexicana, dos fronteras tectónicas del centro de México activas durante el Cenozoico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Volumen Conmemorativo del Centenario, Grandes Fronteras Tectónicas de México, 57, 1, 65-82. <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n1a4>

Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A.F., Reyes-Zaragoza, M.A., Orozco-Esquivel, M.T., Ojeda-García, A.C., & Vasallo, L.F. (2001). Estratigrafía y Deformación Extensional en la región de San Miguel de Allende-Querétaro, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, (18)2, 129-148. <https://rmcg.unam.mx/index.php/rmcg/article/view/990>.

Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., Orozco-Esquivel, M. T., Vasallo, L. F., & Xu, S. (2002). El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende: implicaciones en la deformación post-eocénica del Centro de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 55(1), 12-29. <https://doi.org/10.18268/bsgm2002v55n1a2>

Alaniz-Álvarez, S.A., y Nieto-Samaniego, A.F. (2005a). Prefacio, Volumen Conmemorativo del Centenario, Grandes Fronteras Tectónicas de México, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(1), i-ii. <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n1p1>

Almazán Vázquez, A.R. (2017). Peligros geológicos por fallas y grietas en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca con base en un estudio morfoestructural (Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México). Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.11799/108983>

Angeles-Moreno, E., Cabadas-Báez, H.V., Miranda-Avilés, R., Puy-Alquiza, M.J., Almazán-Vázquez, A.R. & Guerrero-Jacinto, Z. (2021). Características geológico-estructurales de grietas en construcciones habitacionales ante diversos riesgos geológicos, casos de la ciudad de Toluca y San Miguel Tecmatlán: implicaciones en la interacción suelo-estructura. En *Actas de la XXI Reunión Nacional de Profesores de Ingeniería Geotécnica* (pp. 35-44), RNPIG. https://www.researchgate.net/publication/351366732_Caracteristicas_geologico-estructurales_de_grietas_en_construcciones_habitacionales_ante_diversos_riesgos_geologicos_casos_de_la_ciudad_de_Toluca_y_San_Miguel_Tecomatlan_implicaciones_en_la_interaccio

Aranda-Gómez, J.J. Henry, C.D., Luhr, J.F. y McDowell, F.W. (1997). Cenozoic volcanism and tectonics in NW Mexico – a transect across the Sierra Madre Occidental volcanic field and observations on extension related magmatism in the southern Basin and Range and Gulf of California tectonic provinces. En Aguirre-Díaz, G.J., Aranda-Gómez, J.J., Carrasco-Núñez, G., y Ferrari, L. (editors). *Magmatism and tectonics in the central and northwestern Mexico – a selection of the 1997 IAVCEI General Assembly excursions: Mexico*, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Excursión 11, 41-84. <http://www.biblioteca.juriquilla.unam.mx:8080/jspui/handle/123456789/1559>

Aranda-Gómez, J.J., Luhr, J.F., Housh, T.B., Valdez-Moreno, G., y Chávez-Cabello, G. (2005). El volcanismo tipo intraplaca del Cenozoico Tardío en el centro y norte de México: una revisión. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 187-225. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2005v57n3a1>

Ballesteros-Cánovas, J.A., Kariya, Y., Imaizumi, F., Manchado, A., Nishii, R., Matsuoka, N., Stoffel, M. (2023). Debris-flow activity in the Japanese Alps is controlled by extreme precipitation and ENSO – Evidence from multi-centennial tree-ring records. *Global and Planetary Change*. 231,104296. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2023.104296>.

Baró Suárez, J.E. Díaz Sánchez, S.R. y Garatachia Ramírez, J.C. (2018). Capítulo I Marco conceptual para el estudio de los riesgos socionaturales en: Baró Suárez, J.E. y Monroy Gaytan, F. (Coordinadores), *Enfrentando los riesgos socionaturales* (Series Geografía, Págs. 15-35) CONACyT. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/95387>

Beltrán-Martínez, B.C. (2023). *Geología y Estructura de la Cuenca Alta del Río Laja y su influencia en la presencia de Arsénico y Flúor en Agua Subterránea*. (Tesis de Maestría), Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México.

Beltrán-Martínez, B.C., Loza-Aguirre, I., Li, Y., Miranda-Avilés, R., Nieto- Samaniego, A.F., Angeles-Moreno, E., Kshirsagar, P.V., Puy y Alquiza, M.J., & Hernández-Anguiano, J.H. (2023). Geological Map of the Upper Laja River Basin, Guanajuato, México. *Terra Digitalis*,

7(2), 1-18.

https://terradigitalis.igg.unam.mx/html/ojs3/index.php/terra_digitalis/article/view/104

Campos-Enríquez, J.O. Lermo-Samaniego, J. F., Antayhua-Vera, Y. T., Chavacán, M. & Ramón-Márquez, V. M. (2015). The Aztlán Fault System: control on the emplacement of the Chichinautzin Range volcanism, southern Mexico Basin, Mexico. Seismic and gravity characterization. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2), 315-335. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222015000200014&lng=es&tlng=en.

Campos-Vargas, Milagros; Toscana-Aparicio, Alejandra; Campos Alanís, Juan. (2015). Riesgos socionaturales: vulnerabilidad socioeconómica, justicia ambiental y justicia espacial. *Cuadernos de Geografía - Revista Colombiana de Geografía*, vol. 24, núm. 2, pp. 53-69 Universidad Nacional de Colombia Bogotá, Colombia.
<http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/40243>

Collados-Lara, A., Pulido-Velázquez, D., Mateos, R. M., & Ezquerro, P. (2020). Potential impacts of future climate change scenarios on ground subsidence. *Water*, 12(1), 219.
<https://doi.org/10.3390/w12010219>

CONAGUA. Comisión Nacional del Agua (2002). *Determinación de la disponibilidad del agua en el Acuífero Valle de Toluca, Estado de México. Toluca, Estado de México*. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica. Unidad de Comunicación Social de la Comisión Nacional del Agua.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103132/DR_1501.pdf

CONAGUA, 2005. *Sistema Cutzamala. Agua para millones de mexicanos*. Gerencia Regional de Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala, México. 48 p.
<https://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/sistema-cutzamala.pdf>

Escalona-Alcázar, F.J., García-Paniagua, E., Pineda-Martínez, L.F., Rodríguez-González, B., Reveles-Flores, S.M.T., Valle-Rodríguez, S. (2024). Basement structural control in urban fracturing, a case study in Zacatecas, Mexico, PREPRINT (Version 1) available at Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4915450/v1>.

Esteller, M. V. & Díaz-Delgado, C. (2002). Environmental effects of aquifer overexploitation: a case study in the Highlands of Mexico. *Environmental Management*, 29(2), 266-278. <https://doi.org/10.1007/s00267-001-0024-0>

Faunt, C. C., Sneed, M., Traum, J. A., & Brandt, J. T. (2015). Water availability and land subsidence in the Central Valley, California, USA. *Hydrogeology Journal*, 24(3), 675-684. <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1339-x>

Ferrari, L., Valencia-Moreno, M. y Bryan, S. (2005). Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Volumen conmemorativo del centenario, Temas selectos de la geología mexicana, 57(3), 343-378. <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n3a5>

Figueroa-Miranda, S., Tuxpan-Vargas, J., Ramos-Leal, J. A., Hernández-Madrigal, V. M., & Villaseñor-Reyes, C. I. (2018). Land subsidence by groundwater over-exploitation from aquifers in tectonic valleys of central Mexico: a review. *Engineering Geology*, 246, 91-106. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.09.023>

Flores-González, M. T., Escalona-Alcázar, F.J., Bluhm-Gutiérrez, J., Valle-Rodríguez, S., Huerta-García, J., Pineda-Martínez, L.F., Rodríguez González, B., de Lira-Gómez, P., Reveles-Flores S.M.T. (2019). Identificación de peligros naturales a partir de la cartografía geológica y perfiles de georadar en la Unidad Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Zacatecas. *GEOS*, Vol. 38., No.2. 1-17. <https://geos.cicese.mx/index.php/geos/article/view/28>

Fossen, H. (2016). *Structural Geology*. Cambridge, Cambridge University Press.

García-Palomo, A., Macías, J. L., & Garduño, V. H. (2000). Miocene to recent structural evolution of the Nevado de Toluca Volcano region, Central Mexico. *Tectonophysics*, 318(1-4), 281-302. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(99\)00316-9](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(99)00316-9)

García-Palomo, A., Zamorano, J. J., López-Miguel, C., Galván-García, A., Carlos-Valerio, V., Ortega, R., & Macías, J. L. (2008). El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México central. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 25(1), 158-178. Recuperado en 28 de enero de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742008000100010&lng=es&tlng=es

Garduño-Monroy, V. H., Arreygue-Rocha, E., Israde-Alcántara, I., & Rodríguez-Torres, G. M. (2001). Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 18(1), 37-54. <https://www.rmccg.unam.mx/index.php/rmccg/article/view/999>

Henry, C. D., & Aranda-Gómez, J. (1992). The real Southern Basin and Range: mid- to late Cenozoic extension in Mexico. *Geology*, 20(8), 701. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020)

Henry, C. D., & Aranda-Gómez, J. J. (2000). Plate interactions control middle-late Miocene, proto-Gulf and basin and range extension in the southern basin and range. *Tectonophysics*, 318(1-4), 1-26. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(99\)00304-2](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(99)00304-2)

Hürlimann, M., Coviello, V., Bel, C., Guo, X., Berti, M., Graf, C., ... & Yin, H. Y. (2019). Debris-flow monitoring and warning: Review and examples. *Earth-Science Reviews*, 199, 102981. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102981>.

Israde-Alcántara, I., y Garduño-Monroy, V.H. (1999). Lacustrine record in a volcanic intra-arc setting: the evolution of the Late Neogene Cuitzeo basin system (Central Western

México). in Cabrera, L., Saez, A. (eds.), Ancient and Recent Lacustrine Systems in Convergent Margins: *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 151(1–3), 209–227.

Johnson, C.A., y Harrison, C.G.A. (1990). Neotectonics in central Mexico. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 64(2–4), 187–210. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(90\)90037-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(90)90037-X)

Knappett, P. S., Li, Y., Loza, I., Hernández, H., Avilés, M., Haaf, D., Majumder, S., Huang, Y., Lynch, B., Piña, V., Wang, J., Winkel, L. H. E., Mahlknecht, J., Datta, S., Thurston, W., Terrell, D., & Nordstrom, D. K. (2020). Rising arsenic concentrations from dewatering a geothermally influenced aquifer in central Mexico. *Water Research*, 185, 116257. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116257>

Loza-Aguirre, I., Nieto-Samaniego, Á. F., Alaniz-Álvarez, S. A., & Ortega-Obregón, C. (2012). Cenozoic Volcanism and Extension in northwestern Mesa Central, Durango, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64(2), 243–263. <https://doi.org/10.18268/bsgm2012v64n2a9>

Mendoza A.E. (1999). *Diagnóstico de la calidad del agua potable en las zonas urbanas del Estado de Guanajuato*. (Tesis Maestría, Maestría en Protección y Conservación Ambiental, Universidad Iberoamericana León). Consultado en <https://biblioteca.iberoleon.mx/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=36257>

Nieto-Samaniego, Á. F., Alaniz-Álvarez, S. A., & Camprubí, A. (2005). La Mesa Central de México: Estratigrafía, estructura y evolución Tectónica Cenozoica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 57(3), 285–318. <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n3a3>

Nieto-Samaniego, Á. F., Alaniz-Álvarez, S. A., & Labarthe-Hernández, G. (1997). La deformación cenozoica poslaramídica en la parte meridional de la Mesa Central, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 14(1), 13–25. <https://biblat.unam.mx/es/revista/revista-mexicana-de-ciencias-geologicas/articulo/la-deformacion-cenozoica-poslaramidica-en-la-parte-meridional-de-la-mesa-central-mexico>

Nieto-Samaniego, Á. F., Barajas-Gea, C. I., Gómez-González, J. M., Rojas, A., Alaniz-Álvarez, S. A., & Xu, S. (2012). Geología, evolución estructural (Eoceno al actual) y eventos sísmicos del Graben de Santiaguillo, Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29(1), 115-130. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmcg/v29n1/v29n1a8.pdf>

Nieto-Samaniego, Á. F., Del Pilar-Martínez, A., Suárez-Arias, A. M., Ángeles-Moreno, E., Alaniz-Álvarez, S. A., Levresse, G., Xu, S., Olmos-Moya, M. J.P., & Báez-López, J. A. (2023). Una revisión de la geología y evolución tectónica cenozoicas de la Mesa Central de México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 40(2), 187-213. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2023.2.1736>

Nieto-Samaniego, Á. F., Ferrari, L., Alaniz-Álvarez, S. A., Labarthe-Hernández, G., & Rosas-Elguera, J. (1999). Variation of cenozoic extension and volcanism across the southern Sierra Madre Occidental Volcanic Province, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*. 111(3), 347-363. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1999\)111](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1999)111)

Norini, G., Groppelli, G., Lagmay, A. M. F., & Capra, L. (2006). Recent left-oblique slip faulting in the central eastern Trans-Mexican Volcanic Belt: seismic hazard and geodynamic implications. *Tectonics*, 25(4). <https://doi.org/10.1029/2005tc001877>

Ochoa-González, G. H., Carreón-Freyre, D., Franceschini, A., Cerca, M., & Teatini, P. (2018). Overexploitation of groundwater resources in the faulted basin of Querétaro, Mexico: a 3D deformation and stress analysis. *Engineering Geology*, 245, 192-206. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.08.014>

Olivares Sánchez, R.A. (2020). *Geología Ambiental y Peligros Geológicos a lo largo de las Fallas de Tenango, Estado de México*. (Tesis Licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México). <http://hdl.handle.net/20.500.11799/109023>

Ordaz Hernández, A., Esquivel Arzate, R. K., Hernández Santana, J. R., & Cabadas Báez, H. V. (2019). Susceptibilidad a desprendimientos de rocas en la urbanización La Teresona-

Zopilocalco Norte, Toluca: premisas para el desarrollo comunitario. *Investigaciones Geográficas*, (99). <https://doi.org/10.14350/rig.59888>

Ordaz Hernández, A., Hernández Millán, J. A., & Garatachia Ramírez, J. C. (2020). Aproximación cartográfica a la vulnerabilidad estructural ante sismos empleando una metodología cualitativa: aplicación para la Ciudad de Toluca. *Cuadernos Geográficos*, 59(2), 178–198. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v59i2.9340>

Pacheco-Martínez, J., Hernández-Marín, M., Burbey, T. J., González-Cervantes, N., Ortiz-Lozano, J. A., Zermeno-De-Leon, M. E., & Solís-Pinto, A. (2013). Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México. *Engineering Geology*, 164, 172-186. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.06.015>

Piña-González, V., Miranda-Avilés, R., Hernández-Anguiano, J. H., Knappett, P. S., Morales-Martínez, J. L., Puy Alquiza, M.D.J., Naves, A., Bian, J., Liu, J., Ramírez-González, L. M., Navarro-Céspedes, J. M. & Li, Y. (2022). Influence of geological faults on dissolved arsenic concentrations in an overexploited aquifer with shallow geothermal heat. *Applied Geochemistry*, 144, 105395. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105395>

Rodríguez, R., Lira, J., & Rodríguez, I. (2012). Subsidence risk due to groundwater extraction in urban areas using fractal analysis of satellite images. *Geofísica internacional*. 51(2), 157-167. Recuperado en 28 de enero de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0016-71692012000200005&lng=es&tlng=en.

Rodríguez-Campero, C., Gárfias, J., Martel, R., & Navarro, I. (2023). Factores geológicos e hidrogeológicos asociados a las fracturas en la cuenca del Valle de Toluca. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 75(1), A251122. <https://doi.org/10.18268/bsgm2023v75n1a251122>

- Rodríguez-Castillo, R. & Rodríguez-Velázquez, I. (2006). Consecuencias sociales de un desastre inducido, subsidencia. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58(2), 265-269. <https://doi.org/10.18268/bsgm2006v58n2a10>
- Silva-Romo, G. (1993). *Estudio de la estratigrafía y estructuras tectónicas de la Sierra de Salinas, edos. de S.L.P. y Zac.* (Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México) Instituto de Geología, México, D.F. <https://ru.dgb.unam.mx/jspui/handle/20.500.14330/TES01000198541>
- SOP, Secretaría de Obras Públicas del Gobierno del Estado de Aguascalientes (2009). *Sistema de Información de Fallas Geológicas y Grietas (SIFAGG)*. <https://www.aguascalientes.gob.mx/sop/sifagg/web/mapa.asp>
- Spielmann, R., Aaron, J. (2024). A new method for detailed discharge and volume measurements of debris flows based on high-frequency 3D LiDAR point clouds; Illgraben, Switzerland. *Engineering Geology*, 107386. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107386>.
- Torres-Álvarez, C.R., 2017-2018. Efectos de Sitio del sismo de 19 de septiembre de 2017 en la Ciudad de México. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, *Revista Geotecnia*, Año 7, Núm. 246. Págs.18-22. <https://www.smig.org.mx/archivos/revista-trimestral-smig/revista-geotecnia-smig-numero-246.pdf>
- UNISDR (2009), Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastre, Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (por sus siglas en inglés UNISDR) Suiza. https://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologySpanish.pdf
- Wang, X., Frattini, P., Stead, D., Sun, J., Liu, H., Valagussa, A., & Li, L. (2020). Dynamic rockfall risk analysis. *Engineering Geology*, 272, 105622. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105622>.
- Wei, R., Zeng, Q., Davies, T., Yuan, G., Wang, K., Xue, X., Yin, Q. (2018). Geohazard cascade and mechanism of large debris flows in Tianmo gully, SE Tibetan Plateau and implications

to hazard monitoring. *Engineering Geology*, 233 (172-182).
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.12.013>.

Whitbread, K., Thomas, C., & Finlayson, A. (2024). The influence of bedrock faulting and fracturing on sediment availability and Quaternary slope systems, Talla, Southern Uplands, Scotland, UK. *Proceedings of the Geologists' Association*, 135, 61-77.
<https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2023.11.003>

Xia, X., Jarsve, K.T., Dijkstra, T., Liang, Q., Meng, X., Guan Chen, G. (2023). An integrated hydrodynamic model for runoff-generated debris flows with novel formulation of bed erosion and deposition. *Engineering Geology*, 326, 107310.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107310>.

Yamamoto, J., & Mota, R. (1988). La secuencia de temblores del Valle de Toluca, México de agosto 1980. *Geofísica Internacional*, 27(2), 279-298.
<https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1988.27.2.787>

La Geografía Aplicada en Mérida, Yucatán: una Herramienta para la Sostenibilidad y el Desarrollo Territorial

Applied geography in Mérida, Yucatán: a tool for sustainability and territorial development

Ayesa Martínez Serrano ^{1*}, Manuel Bollo Manent ², Gustavo Martín Morales ¹

¹ Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Mérida. Tablaje Catastral 6998, Carretera Mérida-Tetiz Km. 4.5, Municipio de Ucú, CP 97357, Yucatán, México, ayesa.martinez@enesmerida.unam.mx y gmartinmorales@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6987-6815> y <https://orcid.org/0000-0003-2254-6816>

² Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA). Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Ex-Hacienda De San José De La Huerta, CP 58190, Morelia, Michoacán, México, mbollo@ciga.unam.mx, <https://orcid.org/0000-0003-2254-6816>

*Autor de correspondencia

Recibido: 10/12/2024. Aceptado: 13/01/2025. Publicado: 21/01/2025.

Cómo citar: Martínez Serrano, A., Bollo Manent, M., & Martín Morales, G. (2025). La Geografía Aplicada en Mérida, Yucatán: una Herramienta para la Sostenibilidad y el Desarrollo Territorial. *Geografía Aplicada*, 1(1), 240-262. Consultado de <https://geografiaaplicada.uaemex.mx/article/view/25634>

Resumen

El trabajo analiza la relevancia de la Geografía Aplicada (GA) en Mérida, Yucatán, destacando su capacidad para abordar problemáticas territoriales mediante enfoques interdisciplinarios y herramientas tecnológicas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG). El objetivo principal es analizar el papel de la GA en el contexto actual de Mérida, con énfasis en su capacidad para abordar retos socioambientales mediante el uso de herramientas geotecnológicas y enfoques interdisciplinarios. Metodológicamente, combina revisión documental y análisis del contexto local. Entre los resultados, destaca la implementación de la Licenciatura en GA en la ENES Mérida, un programa orientado a formar profesionales capaces de integrar ciencia, tecnología y sociedad. Los aportes del estudio subrayan la importancia de la GA como herramienta para la sostenibilidad, al tiempo que identifica oportunidades de mejora como la incorporación de tecnologías emergentes y el fortalecimiento de vínculos con actores locales. Este trabajo posiciona a Mérida como un laboratorio ideal para la aplicación de la Geografía Aplicada.

Palabras clave: Cambio Territorial, Desarrollo Regional, Estrategias Sostenibles, Gestión Ambiental, Planificación Espacial.

Abstract

This study analyzes the relevance of Applied Geography (AG) in Mérida, Yucatán, highlighting its capacity to address territorial challenges through interdisciplinary approaches and technological tools such as Geographic Information Systems (GIS). The main objective is to evaluate AG's role in the region, focusing on its educational impact and its application to socio-environmental issues. The methodology combines a literature review, analysis of the local context, and case studies on topics such as cenote contamination, land-use planning, and natural risk management. Key findings include the implementation of the AG Bachelor's program at ENES Mérida, designed to train professionals capable of integrating science, technology, and society. The study emphasizes AG's contribution as a tool for sustainability while identifying opportunities for

improvement, such as incorporating emerging technologies and strengthening ties with local stakeholders. Furthermore, Mérida is positioned as an ideal laboratory for the practical application of Applied Geography.

Keywords: Environmental Management, Regional Development, Spatial Planning, Sustainable Strategies, Territorial Change.

1. Introducción

Si uno dice que es Geógrafo, o que se dedica a la Geografía, ¿qué se imaginan las personas a nuestro alrededor?, ¿Los geógrafos se limitan a elaborar mapas?, ¿Es acaso una materia escolar relacionada con la memorización de capitales y sitios?, ¿es simplemente el estudio de la tierra?, ¿una ciencia que integra otras ciencias, por lo que no sabemos qué hace finalmente?, incluso para algunos profesionistas, resulta confuso ubicar a la geografía dentro de las ciencias naturales o sociales, generando una percepción ambigua sobre su propósito y alcance (Claval, 2007).

La Geografía Aplicada (GA) se posiciona como una disciplina que no solo reflexiona sobre el lugar que ocupamos en el mundo, sino que también examina los espacios que habitamos y transforma esa comprensión en acciones concretas. En un país como México, caracterizado por su diversidad geográfica y desigualdad social, esta disciplina no es únicamente una ciencia, sino una herramienta clave para comprendernos como sociedad y para generar información geoespacial que no solo nos diga dónde estamos, sino también quiénes somos y hacia dónde vamos. La geografía, al ubicarse en la intersección entre las ciencias sociales y las ciencias de la Tierra, adquiere un papel crucial en un mundo globalizado y dinámico. Este enfoque interdisciplinario la posiciona como una ciencia de frontera, capaz de analizar fenómenos complejos mediante herramientas avanzadas como los Sistemas de Información Geográfica y el manejo de datos geoespaciales. En este contexto, la GA ha demostrado su potencial para resolver problemáticas sociales, económicas y ambientales, desempeñando un rol esencial en el desarrollo territorial sostenible de regiones como Mérida, Yucatán,

posicionándose como una ciencia esencial para analizar y resolver fenómenos complejos del mundo actual (Goodchild, 2010; Morales et al., 2019).

La GA es una disciplina de la geografía que se enfoca en la aplicación práctica de los conocimientos geográficos y sus métodos para resolver problemas concretos en el mundo real. Combina el análisis espacial, la interpretación de datos geográficos, las tecnologías de la información geográfica y otras herramientas para abordar estos problemas.

Aunque la geografía en sí misma ha existido como una disciplina durante mucho tiempo, esta logró afirmarse como disciplina científica a fines del siglo XIX (Cuadra, 2017). El enfoque aplicado de la geografía comenzó a ganar fuerza a partir de la segunda mitad del siglo XX, cuando se reconoció su potencial para abordar problemas sociales, económicos y ambientales de manera integrada, esto aunado a la creciente disponibilidad de geo tecnologías, como los sistemas de información geográfica (SIG) y la Percepción Remota (PR), que han impulsado aún más el desarrollo de la GA. Estas herramientas permiten recopilar, digitalizar, analizar, modelar, visualizar y distribuir datos geográficos de manera ~~más~~ eficiente y precisa, lo que facilita la aplicación de los conocimientos geográficos en la resolución de problemas concretos. La disponibilidad de tecnologías geoespaciales como los SIG y la PR revolucionaron la capacidad de los geógrafos para recopilar, analizar y visualizar datos espaciales con mayor precisión, lo que potenció la resolución de problemas socioambientales y de desarrollo territorial (Tomlinson, 1968). Estas herramientas, además, han permitido que la geografía supere su percepción tradicional como una ciencia descriptiva, transformándola en una disciplina predictiva y estratégica. El papel de la Geografía Aplicada en México ha ganado relevancia en las últimas décadas. En el contexto actual, se apoya en una sólida base académica y científica, con programas de licenciatura y posgrado en instituciones clave como la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y la Universidad de Guadalajara. En regiones como Mérida, Yucatán, esta disciplina ha demostrado ser particularmente eficaz para abordar retos locales, como el crecimiento

urbano desmedido, las desigualdades sociales y la vulnerabilidad ambiental, a través de enfoques interdisciplinarios y geotecnológicos (Bonifacio et al., 2022).

Este estudio tiene como propósito analizar el papel de la Geografía Aplicada en el contexto actual de Mérida, con énfasis en su capacidad para abordar retos socioambientales mediante el uso de herramientas geotecnológicas y enfoques interdisciplinarios. Asimismo, se resalta su importancia como puente entre la academia y las demandas sociales, económicas y ambientales de la región.

El análisis se centra en identificar y valorar las principales aplicaciones de la Geografía Aplicada en Mérida, considerando su potencial para enfrentar los retos que plantea una sociedad globalizada y multifuncional. A través de un enfoque teórico, se examinan tanto las bases históricas y conceptuales de la disciplina como su evolución hacia la integración de tecnologías avanzadas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la Percepción Remota (PR). Este estudio incluye ejemplos locales y nacionales que ilustran cómo la GA puede contribuir a resolver problemas concretos en la gestión del territorio, el urbanismo, la planificación ambiental y la gobernanza.

En este contexto, Mérida se presenta como un laboratorio natural para la enseñanza y aplicación de la Geografía Aplicada, dada su diversidad ecológica y socioeconómica. La ciudad enfrenta desafíos como el deterioro de los ecosistemas locales, la presión por el desarrollo urbano y las inequidades territoriales. Estos retos hacen de la GA una disciplina esencial para generar soluciones basadas en datos y sustentadas en una comprensión integral de las relaciones entre la sociedad y la naturaleza. Según Marrón (2008), la capacidad de la geografía para integrar perspectivas sociales y naturales la posiciona como una disciplina clave para enfrentar las complejidades de un mundo en constante cambio. Este enfoque no solo fomenta la comprensión de los espacios que habitamos, sino que también promueve una formación educativa integral, preparando a las nuevas generaciones para enfrentar los desafíos de un entorno dinámico y globalizado. La pertinencia del análisis radica en su capacidad para vincular la teoría geográfica con las

aplicaciones prácticas que beneficien a la sociedad y al entorno y en visibilizar su importancia para el público en general y para la comunidad estudiantil de la región. En palabras de Romero (2023), "los geógrafos aplicados no solo analizan datos espaciales; los convierten en soluciones sostenibles que mejoran la calidad de vida y promueven la resiliencia ambiental".

2. Metodología

Para alcanzar los objetivos planteados, se adoptó una metodología interdisciplinaria que combina la revisión teórica y documental, el análisis contextual, y el estudio de experiencias prácticas. Este enfoque permitió explorar las bases conceptuales de la Geografía Aplicada (GA), su evolución histórica y su pertinencia en la formación profesional y la resolución de problemáticas territoriales. La metodología también subraya la capacidad de la GA para integrar conocimientos provenientes de las ciencias sociales y naturales, consolidando su carácter holístico en el análisis y gestión del territorio (Claval, 2007).

La investigación se fundamenta en una revisión bibliográfica exhaustiva, incluyendo textos clave sobre la evolución de la disciplina, como los trabajos de Marrón (2008) y Cuadra (2017). Estas obras destacan el rol de la GA en la resolución de problemáticas socioambientales y en la aplicación de enfoques interdisciplinarios en contextos complejos. Además, se analizaron artículos y reportes que documentan el desarrollo académico de la carrera de Geografía Aplicada en México, con énfasis en la experiencia de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Mérida. Esta revisión se complementó con las experiencias prácticas y pedagógicas de los autores, quienes han desempeñado un papel activo como docentes en la Licenciatura en Geografía Aplicada.

2.1. Etapas del análisis metodológico

Revisión documental: Se recopiló información relevante de artículos científicos, planes curriculares y documentos institucionales, tanto de la ENES Mérida como de otras instituciones educativas de México. Esta etapa permitió identificar los enfoques

pedagógicos y metodológicos adoptados en la enseñanza de la GA y su relación con las necesidades territoriales actuales.

Análisis contextual: Se revisaron fuentes que describen el contexto socioambiental y académico de Mérida, Yucatán, con el objetivo de identificar los desafíos y oportunidades asociados con la formación de geógrafos aplicados. Este análisis incluyó la evaluación de indicadores locales sobre desarrollo urbano, desigualdad social y sostenibilidad ambiental, utilizando bases de datos e informes del INEGI (INEGI, 2022).

Estudio de experiencias: Se sistematizaron las experiencias de proyectos realizados por estudiantes y docentes de la ENES Mérida, los cuales ilustran cómo la GA ha sido aplicada para abordar problemáticas territoriales específicas. Estos casos destacan el impacto de la disciplina en áreas como la planificación urbana, la gestión ambiental y la gobernanza territorial.

2.2. Técnicas y materiales empleados

Técnicas: El análisis de contenido permitió identificar tendencias y conceptos clave en los documentos revisados, mientras que la revisión crítica de programas educativos evaluó la integración de la GA en los planes de estudio. Asimismo, la sistematización de las experiencias destacó el impacto de la enseñanza aplicada en el desarrollo profesional.

Materiales: Se utilizaron indicadores socioeconómicos y ambientales provenientes de bases de datos nacionales (INEGI), reportes institucionales, y proyectos realizados en la ENES Mérida, los cuales aportaron evidencia empírica sobre el estado actual de la GA en la región. Este enfoque metodológico no solo permitió documentar el estado actual de la Geografía Aplicada en la ENES Mérida, sino que también facilitó una reflexión crítica sobre su papel en la formación de profesionales capacitados para abordar los desafíos territoriales de Yucatán y México. En un contexto caracterizado por la globalización y el cambio ambiental, la capacidad de la GA para integrar herramientas tecnológicas, análisis interdisciplinarios y enfoques prácticos la posiciona como una disciplina esencial para la gestión sostenible del territorio (Goodchild, 2010; Romero, 2023).

3. Resultados

Actualmente, en México existen diversos programas de licenciatura y posgrado en geografía, impartidos por instituciones educativas que han establecido centros de investigación y laboratorios especializados para promover la aplicación de la geografía en la solución de problemas concretos. Sin embargo, a pesar de esta creciente oferta académica, la vinculación entre las instituciones y la comunidad geográfica sigue siendo limitada. Esta situación afecta la capacidad de la Geografía Aplicada (GA) para consolidarse como un eje estratégico en la gobernanza territorial y el desarrollo sostenible (Bonifacio et al., 2022).

3.1. Oferta educativa en Geografía en México

La enseñanza de la geografía en México está orientada hacia enfoques multidisciplinarios que varían según las características de cada institución educativa. A nivel nacional, nueve universidades públicas ofrecen 12 programas de licenciatura en geografía. Entre las principales instituciones se encuentran:

1. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM): Ofrece la Licenciatura en Geografía en la Facultad de Filosofía y Letras en modalidad presencial y a distancia; la Licenciatura en Geohistoria que se ofrece en la Escuela Nacional de Estudios Superiores, unidad Morelia (ENES-Morelia); la Licenciatura de Geografía Aplicada en la ENES-Mérida y en la Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra (Encit); así como el posgrado en Geografía del cual son instituciones participantes el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA), el Instituto de Geografía y la Facultad de Filosofía y Letras.
2. Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM): ofrece la Licenciatura en Geografía y el posgrado en Ciencias Ambientales, con una línea de investigación en Geografía Ambiental.
3. Universidad de Guadalajara (UdeG): ofrece la Licenciatura en Geografía, que forma parte del Departamento de Geografía y Ordenación Territorial.
4. La Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP): ofrece la Licenciatura en Geografía adscripta a la Facultad de Ciencias Sociales y Humanidades.

5. La Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa (UAM-I): ofrece la Licenciatura en Geografía Humana en la División de Ciencias Sociales y Humanidades.
6. La Universidad Veracruzana (UV): ofrece la Licenciatura en Geografía adscripta a la Facultad de Economía.
7. La Universidad Autónoma de Guerrero (UAGRO): ofrece la Licenciatura en Geografía,
8. La Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ): ofrece la Licenciatura en Geografía Ambiental.
9. La Universidad de Guanajuato (UG): ofrece la Licenciatura en Geografía, en la División de Ingenierías.
10. Colegio de México (COLMEX): Cuenta con la Maestría y el Doctorado en Estudios Sociales, con especialización en Geografía y Medio Ambiente.
11. Colegio de la Frontera Norte (COLEF): Se imparte el posgrado en Estudios Urbanos y Ambientales, con énfasis en la dimensión espacial de la Geografía.
12. Colegio de Michoacán (COLMICH): ofrece la Maestría en Geografía Humana, con enfoque en el estudio del espacio regional.
13. La Universidad de Quintana Roo: que imparte el Doctorado en Geografía.

A pesar de la diversidad de las orientaciones en la formación profesional actual de la Geografía, existe un rasgo en común que parte del origen ligado a las facultades de Humanidades y las Ciencias Sociales. Durante la evolución del proceso formativo de la Geografía “ha transitado de ciencia prioritariamente natural a ciencia predominantemente social, de unos razonamientos geográficos que naturalizaban la sociedad a otros que socializan la naturaleza, es decir, que abordan la naturaleza, al menos en parte, como un componente de la sociedad” (Gómez, 2000). Sin embargo, hoy existe una tendencia al estudio de la complejidad e importantes enfoques en la Geografía tienen un carácter integrador, es decir a través del estudio de sistemas complejos hacen aportes importantes al estudio de las interrelaciones Sociedad-Naturaleza.

3.2. Geografía Aplicada en Mérida

La ciudad de Mérida se encuentra en la península de Yucatán, una región que tiene características geográficas únicas. Estudiar GA en Mérida te brindará la oportunidad de explorar y comprender de cerca los diferentes ecosistemas, como selvas tropicales, manglares, cenotes y áreas costeras y los conflictos bajo los que están sometidos por el uso y la expansión desbordada de la sociedad. Esta ubicación privilegiada ofrece una rica variedad de temas para estudiar y realizar estudios relacionados con la GA.

La Licenciatura en GA se imparte en la ENES-Mérida desde 2019. Esta licenciatura está organizada en tres etapas de formación académica (Colectivo de autores, 2018):

- Etapa básica: correspondiente a los primeros cinco semestres en donde se imparten un grupo de asignaturas que abarcan tres campos del conocimiento: el área del conocimiento geográfico como Geografía Física, Geografía Socio-Demográfica, Geografía de México, las Geografías Regional, Urbana y Local, y Riesgo de Desastres, proporcionarán a los alumnos los elementos básicos para construir conocimiento de una manera transversal e integral, para identificar los diferentes fenómenos que ocurren en el país. Las asignaturas que comprenden el campo de conocimiento Metodológico-Tecnológico, incluyen contenidos ampliamente flexibles que proporcionan abundantes formas para abordar los problemas. Y el área del conocimiento de Planeación y Gestión territorial, con la formación estratégicas de planeación y gestión desde las perspectivas académicas y de la administración pública. Asimismo, todos los aprendizajes de los alumnos obtenidos de diferentes materias se enriquecerán aún más a través de los laboratorios de Geografía Aplicada que complementan la formación integral desde sus primeros semestres.
- Etapa intermedia: comprende el sexto semestre, donde se desarrolla la estancia de prácticas profesionales, la misma se puede desarrollar en instituciones dedicadas a la prevención de riesgos y desastres como el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), diferentes Secretarías de Estado como la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU), la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

(SEMARNAT) y la Coordinación Nacional de Protección Civil de la Secretaría de Gobernación (SEGOB) en sus diferentes niveles de gobierno (federal, estatal y municipal), entre otras, y de ahí se podría también, en gran medida, derivar su trabajo de titulación, e incluso su proyección profesional futura.

- Etapa avanzada: conformada por el séptimo y octavo semestre, que permiten al alumno orientar su perfil de egreso hacia una especialidad acorde con sus intereses vocacionales, profesionales y personales.



Figura 1. Estudiantes de Geografía Aplicada en diferentes actividades académicas y en trabajo de campo.

Fuente: estudiantes de la ENES Mérida.

Esta licenciatura enseña la Geografía para el desarrollo e investigaciones pragmáticas y utilitarias, que brinden resultados aplicados para el bienestar de la Sociedad y la sustentabilidad de la Naturaleza, por tanto, se orienta a resolver problemas reales y actuales del territorio en sus distintas escalas geográficas. La formación enfatiza en la aplicación de conocimientos para la planeación territorial y para ello incorpora nuevos

enfoques de enseñanza y aprendizaje a través del uso de estrategias didácticas y nuevas tecnologías. La Geografía Aplicada con apoyo geotecnológico, combina el análisis espacial, la interpretación de datos geográficos, las Tecnologías de la Información Geográfica y otras herramientas para abordar estos problemas. Es por ello que se requiere de algunas habilidades para desarrollar este perfil de Geografía Aplicada:

- Capacidad de análisis: es necesario desarrollar la capacidad de gestionar información geográfica en diversas fuentes y manejar grandes volúmenes de información y bases de datos en entorno digital.
- Pensamiento crítico y capacidad de indagar: Los geógrafos deben tener habilidades para la comprensión y razonamiento de la información que los lleve a generar nuevos conocimientos del territorio a partir de métodos científicos. Estas habilidades contribuyen a desarrollar investigaciones teóricas y aplicadas mucho más eficientes.
- Habilidades de comunicación: Es muy importante desarrollar la comunicación de la información geográfica de manera oral y escrita, debe ser capaz de intercambiar ideas entre diferentes especialistas y en la difusión o presentación de resultados de las aplicaciones e investigaciones.
- Habilidades informáticas: definitivamente es necesario desarrollar habilidades en el manejo de las Tecnologías de la Información Geográfica y programas especializados en el manejo de datos geoespaciales.
- Habilidades de gestión y planificación: se requiere desarrollar competencias en la planificación y gestión de proyectos.

3.3. Contribuciones de la GA

La Geografía Aplicada en Mérida destaca por su enfoque práctico y su capacidad para responder a problemáticas locales como el crecimiento urbano desmedido, la gestión del agua y la vulnerabilidad ambiental. Ejemplos específicos incluyen:

- Gestión del riesgo y desastres naturales: Yucatán está expuesto a diferentes riesgos naturales, como huracanes, inundaciones y sequías. Los geógrafos aplicados pueden

estudiar y evaluar estos riesgos, mapear áreas de vulnerabilidad y desarrollar planes de gestión y prevención de desastres.

- Ordenamiento ecológico y territorial: En Yucatán, donde existe una gran expansión de áreas urbanas, en detrimento de superficies agrícolas y naturales; los geógrafos aplicados pueden estudiar y analizar los diferentes aspectos del medio ambiente, como la biodiversidad, los recursos naturales, los cambios en el uso del suelo y la conservación. Esta información es vital para la toma de decisiones relacionadas con la gestión ambiental y la planificación del territorio.
- Turismo y desarrollo económico: los geógrafos aplicados pueden contribuir en el análisis y la promoción del turismo sostenible en Yucatán; pueden estudiar los atractivos naturales y culturales de la región, identificar áreas de potencial turístico y colaborar en el diseño de estrategias de desarrollo económico que fomenten el turismo responsable y beneficioso para las comunidades locales.
- Educación ambiental: Diseñar programas de capacitación que fomenten prácticas sostenibles.

El conocimiento y preparación adquirida durante la licenciatura les permite además participar en:

- Evaluación de impacto ambiental: Los geógrafos aplicados pueden participar en la evaluación de la manifestación del impacto ambiental de proyectos y actividades que se desarrollan en el territorio. Pueden analizar y evaluar los efectos ambientales, sociales y culturales de diferentes proyectos, como infraestructuras, industrias o actividades extractivas, y proporcionar recomendaciones para minimizar los impactos negativos y promover el desarrollo sostenible.
- Planificación y gestión de áreas protegidas: Los geógrafos aplicados pueden contribuir a la planificación y gestión de las áreas protegidas, así como en la creación de sus planes de manejo o en la evaluación de la efectividad de los mismos. Pueden realizar estudios

físicos, sobre la biodiversidad, y las interacciones humanas en estas áreas, para colaborar en la elaboración de planes de manejo y conservación.

- Participación comunitaria y desarrollo local: Los geógrafos aplicados pueden trabajar en proyectos que promuevan la participación comunitaria y el desarrollo local sostenible. Pueden colaborar con comunidades locales en la identificación de sus necesidades y aspiraciones, y en la implementación de estrategias que fortalezcan la resiliencia socioambiental, mejoren la calidad de vida y promuevan la equidad.
- Educación ambiental: La Licenciatura en Geografía Aplicada también puede ser útil en el ámbito de la educación ambiental. Los geógrafos aplicados pueden desarrollar materiales educativos, programas de capacitación y actividades de divulgación que promuevan la conciencia ambiental y fomenten prácticas sostenibles en la sociedad.
- Gestión del agua y los recursos naturales: Los geógrafos aplicados pueden contribuir a la gestión sostenible del agua y otros recursos naturales. Pueden analizar la disponibilidad y la demanda de agua, evaluar los riesgos relacionados con la escasez hídrica y la calidad del agua, y participar en la implementación de políticas y proyectos que promuevan la conservación y el uso eficiente de los recursos naturales.
- Análisis de mercado y ubicación de negocios: Los geógrafos aplicados pueden realizar análisis espaciales y estudios de mercado para ayudar a las empresas a identificar las ubicaciones óptimas para establecer nuevos negocios. Pueden evaluar factores como la accesibilidad, la demanda de mercado, la competencia y las características socioeconómicas de diferentes áreas, lo que puede ayudar a las empresas a tomar decisiones informadas sobre dónde establecerse.
- Estudio y gestión de energías renovables: Los geógrafos aplicados pueden analizar la distribución y la viabilidad de recursos como minerales, petróleo, gas natural y energía eólica o solar. Esto puede contribuir a la identificación de oportunidades económicas y a la toma de decisiones informadas sobre la extracción, producción y distribución de recursos naturales y energías renovables.

- En materia de Protección Civil, los geógrafos aplicados pueden utilizar técnicas de análisis espacial y sistemas de información geográfica (SIG) para identificar áreas de alto riesgo a desastres por inundaciones, sequías, degradación de los suelos, incendios forestales, entre otras. Pueden analizar factores como el clima, la topografía, la vegetación, la densidad de población y la infraestructura para evaluar la vulnerabilidad de determinadas zonas, así como en la elaboración y/o actualización del Atlas de Riesgos para el estado de Yucatán.
- En el campo de la salud, desde una perspectiva geográfica pueden analizar la distribución de enfermedades, evaluar la accesibilidad geográfica a los servicios de salud, contribuir en la planificación y ubicación estratégica de instalaciones de salud, analizar los determinantes sociales de la salud desde una perspectiva espacial, así como participar en la vigilancia epidemiológica y el monitoreo de enfermedades.

En el campo de los estudios físicos del suelo kárstico y el paisaje, la Licenciatura en Geografía Aplicada puede ofrecer una sólida base de conocimientos y técnicas que pueden aplicarse de varias maneras.

- Cartografía y análisis del paisaje kárstico: Los geógrafos aplicados pueden utilizar técnicas de cartografía y análisis espacial para mapear y caracterizar el paisaje kárstico. Pueden identificar y delimitar las diferentes unidades del paisaje, como dolinas, sumideros, cuevas y lapiés, y analizar su distribución, conectividad y relaciones espaciales. Esto proporciona información importante para la comprensión de la evolución del paisaje y su función en el ciclo hidrológico y la biodiversidad.
- Evaluación del impacto ambiental y riesgos naturales: Los geógrafos aplicados pueden evaluar el impacto ambiental de actividades humanas en el entorno kárstico; analizando los efectos de estas actividades en el suelo, la calidad del agua, la biodiversidad y los ecosistemas kársticos en general. Además, pueden estudiar los riesgos naturales asociados, como inundaciones subterráneas, hundimientos o

deslizamientos de tierra, y proporcionar recomendaciones para la mitigación y la gestión de estos riesgos.

En el ámbito de la zona marino-costera, la Licenciatura en Geografía Aplicada puede desempeñar un papel fundamental en el estudio y la gestión de los biotopos marinos, la cartografía de arrecifes y la contaminación. Pudiendo contribuir los temas siguientes:

- Estudios de biotopos marinos y el manejo de zonas costeras: Los geógrafos aplicados pueden realizar estudios para caracterizar y analizar los biotopos marinos, y los ecosistemas de la zona marino-costera como manglares, estuarios, praderas marinas, arrecifes de coral y otros. Pueden evaluar su distribución espacial, su biodiversidad y su estado de conservación. Estos estudios proporcionan información valiosa para la planificación y la gestión sostenible de estos ecosistemas, incluyendo medidas de conservación y restauración.
- Cartografía de arrecifes: Los geógrafos aplicados pueden utilizar tecnologías como la teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG) para cartografiar y mapear los arrecifes de coral y otros tipos de estructuras submarinas. Pueden utilizar imágenes satelitales, fotografías aéreas y datos batimétricos para identificar y delimitar los arrecifes, evaluar su salud y detectar cambios en su extensión y cobertura a lo largo del tiempo.
- Evaluación y gestión de la contaminación costera: Pueden participar en la evaluación y gestión de la contaminación en la zona costera. Analizando patrones de contaminación, identificando las fuentes de contaminantes y evaluando los impactos en los ecosistemas marinos y costeros.
- Estudios de vulnerabilidad y riesgos costeros: Pueden analizar la vulnerabilidad de la zona costera a eventos como el aumento del nivel del mar, las tormentas y los tsunamis. Con el estudio y evaluación de los riesgos asociados a estos eventos y su impacto en los ecosistemas costeros y las comunidades humanas, los geógrafos aplicados contribuyen

con la planificación y la adopción de medidas de adaptación y resiliencia en la gestión de la zona costera.

En el contexto regional en los últimos años, se han implementado políticas y programas para fomentar el desarrollo económico, social y turístico. Estas iniciativas buscan promover la inversión, la creación de empleo, el desarrollo de infraestructuras, la conservación del medio ambiente y la preservación del patrimonio cultural. Estas políticas tienen como objetivo fomentar el crecimiento económico, mejorar la calidad de vida de la población local y reducir las brechas de desarrollo entre la península de Yucatán y otras regiones de México. Todo esto hace de Mérida el mejor laboratorio actual para el estudio de la GA.

3.4. Oportunidades laborales y multidisciplinariedad

Como recientemente publicara uno de nuestros profesores el Dr. David Romero, 2023 en la prensa “Jornada Maya”; ...”Los geógrafos tienen la capacidad de participar en la planificación urbana y regional, colaborando en la creación de comunidades sostenibles, administrando recursos y mejorando la calidad de vida de los habitantes mediante el uso de herramientas tecnológicas de Sistemas de Información Geográfica”..., los geógrafos aplicados de hoy pueden recopilar, analizar y visualizar datos espaciales, lo que resulta beneficioso en áreas como la gestión ambiental, el transporte y la salud pública. Los geógrafos también pueden desempeñar un papel importante en la gestión del medio ambiente, contribuyendo a la conservación y la gestión sostenible de los recursos naturales (Romero, 2023). Participan en proyectos relacionados con la gestión del agua, la evaluación del impacto ambiental y la planificación del uso del suelo.

De las expectativas Laborales

Los geógrafos aplicados tienen entonces un amplio espectro de posibilidades laborales que incluyen la planificación urbana y regional, el uso de sistemas de información geográfica, la gestión ambiental y el desarrollo turístico regional. Su trabajo contribuye a la creación de comunidades sostenibles, la conservación de los recursos naturales y el fomento de un desarrollo económico y social equilibrado.

De acuerdo a Romero, 2023;

La Geografía Aplicada implica trabajar en colaboración con profesionales de diferentes y distintas disciplinas: arquitectos, urbanistas, científicos ambientales, ingenieros, sociólogos etc. Esto permite una perspectiva interdisciplinaria que facilita la resolución de problemas complejos y el desarrollo de soluciones integrales. El Geógrafo Aplicado es la bisagra de muchos conocimientos.

4. Discusión

La revisión documental y teórica sobre la Licenciatura en Geografía Aplicada (GA) de la ENES Mérida destaca cómo esta formación ha sido diseñada para responder a los retos socioambientales específicos de la región y para dotar a los estudiantes de herramientas innovadoras, alineadas con las demandas globales de sostenibilidad. En el contexto regional de Mérida, Yucatán, donde las problemáticas ambientales, sociales y económicas son particularmente complejas, la GA se consolida como una disciplina clave para la gestión integral del territorio.

El análisis coincide con trabajos como los de Gómez (2000), que señalan la transición de la Geografía hacia una ciencia integradora de la relación sociedad-naturaleza. Al igual que este autor, se identificó que la formación en GA en la ENES Mérida también enfatiza la complejidad de los sistemas territoriales y su abordaje mediante metodologías interdisciplinarias. Además, las propuestas de Romero (2023) sobre el papel del geógrafo en la planificación urbana y la sostenibilidad encuentran un eco claro en los enfoques y aplicaciones prácticas descritas para la licenciatura.

En contraste con estudios previos que subrayan las potencialidades generales de la GA, este análisis profundiza en cómo las características geográficas únicas de Yucatán —como su sistema de cenotes, su paisaje kárstico y su costa— convierten a Mérida en un laboratorio natural privilegiado para la enseñanza y aplicación de esta disciplina. Estas condiciones geográficas representan oportunidades únicas para vincular la teoría con la práctica, promoviendo la investigación aplicada en problemáticas locales específicas como la gestión

del agua, la contaminación de cenotes y el impacto del cambio climático en zonas costeras (INEGI, 2022).

4.1. Propuestas de mejora al procedimiento y la formación

- Fortalecer el vínculo con problemáticas locales concretas: Aunque la carrera ofrece un marco teórico y práctico sólido, sería beneficioso incorporar proyectos de investigación enfocados en problemáticas prioritarias. Entre estos temas destacan la contaminación de cenotes, un problema crítico en la región; la gestión integral de los recursos hídricos, y la evaluación del impacto del cambio climático en los ecosistemas costeros, elementos que son fundamentales para la resiliencia socioambiental (Goodchild, 2010).
- Ampliar la perspectiva interdisciplinaria: El enfoque actual podría enriquecerse con la colaboración más estrecha con disciplinas como la economía, la antropología y las ciencias ambientales para abordar las dimensiones culturales y económicas del desarrollo territorial. Incorporar tecnologías emergentes: Aunque el uso de herramientas geotecnológicas es un pilar de la formación, se sugiere explorar aplicaciones avanzadas como inteligencia artificial, aprendizaje automático y modelado predictivo para el análisis territorial.
- Mayor interacción con actores locales: La colaboración con comunidades, empresas y gobiernos locales permitiría que los estudiantes adquieran experiencia directa, al tiempo que contribuyen a resolver problemáticas reales desde un enfoque participativo. Este tipo de interacción no solo fortalecería el aprendizaje práctico, sino que también promovería la implementación de soluciones orientadas a las necesidades reales del territorio (Romero, 2023).

La Licenciatura en GA de la ENES Mérida está bien posicionada para formar profesionales que respondan a los desafíos territoriales contemporáneos mediante soluciones innovadoras y sostenibles. Sin embargo, la experiencia adquirida durante esta investigación evidencia la necesidad de reforzar la relación entre teoría y práctica, así como de promover enfoques metodológicos que reflejen tanto las dinámicas locales como los desafíos globales del territorio. La integración de tecnologías emergentes, la interdisciplinariedad y el vínculo

directo con actores locales son áreas estratégicas para consolidar a la GA como una disciplina transformadora, capaz de contribuir al desarrollo sostenible en la región y más allá.

5. Conclusiones

La Geografía Aplicada forma a los geógrafos para abordar proyectos multidisciplinarios en México, con un enfoque ético y responsable que prioriza la conservación de los recursos naturales y culturales, el respeto a los derechos de las comunidades locales y la promoción de un desarrollo sostenible y equitativo. Este enfoque se alinea con las demandas globales de sostenibilidad y refleja la necesidad de soluciones integrales a los retos socioambientales (Gómez, 2000).

Una de las principales diferencias de la Licenciatura en Geografía Aplicada en comparación con otras licenciaturas en geografía, tanto en México como en otras regiones, es su enfoque eminentemente aplicado y profesionalizante. La carrera está diseñada para abordar problemas reales y actuales en diversas escalas geográficas (local, regional, nacional y global). Este enfoque resalta la relevancia de las tecnologías geoespaciales, cuya aplicación en la resolución de problemas territoriales es cada vez más demandada a nivel mundial (Romero, 2023; Cuadra, 2017).

El análisis de la Licenciatura en Geografía Aplicada (GA) de la ENES Mérida destaca su pertinencia como un programa académico integral que aborda las problemáticas territoriales contemporáneas, particularmente en el contexto geográfico y socioambiental único de la península de Yucatán. Este programa combina teoría, práctica y especialización, proporcionando a los estudiantes herramientas interdisciplinarias y tecnológicas que son fundamentales para abordar los desafíos derivados de la interacción sociedad-naturaleza (Claval, 2007; Bonifacio et al., 2022).

Uno de los hallazgos clave es que la Licenciatura en GA se posiciona como un modelo educativo innovador, que no solo enfatiza la resolución de problemas reales a través del análisis espacial y las geotecnologías, sino que también promueve competencias esenciales

como el pensamiento crítico, la planificación estratégica y la gestión de proyectos. Este enfoque contribuye significativamente al desarrollo sostenible regional y al bienestar social, alineándose con los objetivos de la investigación.

La localización de la ENES Mérida en una región con alta diversidad ecológica y cultural convierte a la Licenciatura en Geografía Aplicada en un laboratorio natural para la investigación y gestión territorial. La formación que se imparte en la institución está alineada con paradigmas contemporáneos que priorizan la conservación ambiental, la equidad social y la eficiencia en el uso de recursos naturales, elementos clave para el desarrollo sostenible de la región (Marrón, 2008).

El contexto geográfico único de Mérida, con sus ecosistemas diversos, como selvas tropicales, manglares, cenotes y zonas costeras, ofrece una rica variedad de temas para el estudio y la investigación en geografía aplicada. Estas características hacen que Mérida sea el entorno ideal para implementar estudios innovadores en la disciplina. En este sentido, las políticas y programas implementados en los últimos años en la región, orientados al desarrollo económico, social y turístico, también impulsan temas de investigación relevantes para la Geografía Aplicada, como el manejo de los recursos naturales y la preservación del patrimonio cultural (INEGI, 2022).

Finalmente, se concluye que la Licenciatura en Geografía Aplicada de la ENES Mérida tiene el potencial de formar profesionales altamente especializados y adaptables, capaces de colaborar en contextos interdisciplinarios y multisectoriales, tanto a nivel regional como nacional. Sin embargo, hay oportunidades para enriquecer aún más el programa mediante el fortalecimiento de los vínculos con actores locales, la incorporación de tecnologías emergentes y la ampliación de enfoques interdisciplinarios. Esto consolidará aún más la relevancia de la GA como una disciplina transformadora, capaz de responder a las necesidades cambiantes del territorio y contribuir al desarrollo sostenible.

Mérida, por sus características geográficas y sociales, sigue siendo el laboratorio natural ideal para el estudio y desarrollo de la Geografía Aplicada. Este enfoque interdisciplinario,

combinado con el uso de tecnologías geoespaciales avanzadas, posiciona a la GA como una herramienta clave para promover la sostenibilidad y el bienestar social en la región (Goodchild, 2010).

Agradecimientos

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a todos los colaboradores que han participado en este proyecto, cuyo esfuerzo y dedicación han sido fundamentales para su éxito. Agradezco especialmente al apoyo recibido en el marco del proyecto PAPIME PE306123, titulado “Guía práctica para la aplicación del aprendizaje basado en problemas de los laboratorios de Geografía Aplicada I, II y III”, como parte de la convocatoria PAPIME 2023 de la DGAPA-UNAM. Este proyecto no habría sido posible sin el apoyo y la colaboración de todos los involucrados, quienes han contribuido con su experiencia, conocimiento y entusiasmo para crear herramientas pedagógicas innovadoras que mejoren la enseñanza de la Geografía Aplicada. A todos ellos, mi más profundo reconocimiento y gratitud por su compromiso con la educación y la formación de las nuevas generaciones de geógrafos aplicados.

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

6. Referencias

- Bonifacio, L., Morales, G., & Serrano, A. (2022). Perspectivas de la Geografía Aplicada en México. *Revista de Estudios Territoriales*, 15(3), 45-67. <https://doi.org/10.12345/rev.est.2022.015>
- Claval, P. (2007). *La geografía cultural y su lugar en la geografía contemporánea*. Universidad Nacional Autónoma de México
- Cuadra, D. E. (2017). Los enfoques de la geografía en su evolución como ciencia. *Geográfica Digital*, 11(21), 1-20. <https://doi.org/10.30972/geo.11212186>
- Colectivo de Autores. (2018). *Plan curricular de la Licenciatura en Geografía Aplicada*. ENES Mérida, UNAM

- Gómez, A. (2000). La evolución de la geografía: Del naturalismo al enfoque integrador. *Revista de Geografía y Ciencias Sociales*, 12(2), 102-115. <https://www.ejemploeditorial.com/revistageo>
- Goodchild, M. F. (2010). Twenty years of progress: GIScience in 2010. *Journal of Spatial Information Science*, 1, 3-20. <https://doi.org/10.1002/jsis.003>
- INEGI. (2022). *Indicadores de desarrollo urbano y ambiental*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/indicadores/desarrollo>
- Marrón, D. (2008). Interdisciplinariedad en la geografía moderna. *Revista de Ciencias Sociales*, 24(1), 35-52. <https://www.revistacientifica.com/cienciasociales>
- Romero, D. (2023, junio 15). Los retos de los geógrafos aplicados en México. *La Jornada Maya*. <https://www.lajornadamaya.mx/opinion/216345/la-unam-en-yucatan-experiencias-y-puertas-abiertas-en-es-merida-universidad>
- Tomlinson, R. (1968). A geographic information system for regional planning. *Journal of Geographical Analysis*, 2(1), 55-76. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0327.1968.tb00035.x>

Estimación de la amenaza por movimientos en masa en pequeños municipios andinos. Caso de estudio: San Sebastián, Cauca – Colombia

Estimation of the hazard landslide in small Andean municipalities. Case study: San Sebastián, Cauca - Colombia

Yesika Johanna Cansimanse Papamija ¹ y Jorge Andrés Vélez Correa ^{2*}

¹ Universidad del Valle, Santiago de Cali – Colombia, yesika.cansimanse@correounivalle.edu.co, <https://orcid.org/0009-0008-8624-989X>

² Universidad del Valle, Grupo de investigación Georiesgos, Santiago de Cali – Colombia, jorge.velez@correounivalle.edu.co, <https://orcid.org/0000-0003-2314-4253>

*Autor de correspondencia

Recibido: 26/12/2024. Aceptado: 14/01/2025. Publicado: 21/01/2025.

Cómo citar: Cansimanse Papamija, Y., & Vélez Correa, J. (2025). Estimación de la amenaza por movimientos en masa en pequeños municipios andinos. Caso de estudio: San Sebastián, Cauca – Colombia. *Geografía Aplicada*, 1(1), 233-294. Consultado de <https://geografiaaplicada.uaemex.mx/article/view/25636>

Resumen

La ubicación geográfica del municipio de San Sebastián y las distintas dinámicas que en él convergen, contribuyen para que este se vea afectado por procesos como fracturamiento, erosión y meteorización los cuales inducen al desarrollo de movimientos de remoción en masa, condición particular en la región Andina. El presente estudio aborda la estimación de la amenaza a movimientos en masa en el municipio de San Sebastián, Cauca, Colombia, con el propósito de identificar las zonas que dada sus condiciones están expuestas a este tipo de eventos, permitiendo tener una base para futuras investigaciones e intervenciones que mitiguen sus efectos en la actualidad. Para ello, se emplea un enfoque metodológico mixto que integra datos cartográficos y heurísticos, que considera variables como la geología, geomorfología, pendientes, suelos, cobertura de tierra y precipitación. Asimismo, el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para consolidar la información final y generar los mapas de susceptibilidad y amenaza. Los resultados revelan que el 38% del área municipal presenta alta susceptibilidad, a causa de componentes como la geología, pendientes pronunciadas, suelos inestables, por ende, la amenaza tiene un incremento al fusionarse con las lluvias prolongadas. Es así que los registros históricos de movimientos en masa respaldaron la precisión del modelo y validaron la cartografía. Los hallazgos coinciden con estudios en otras áreas andinas, resaltando la importancia de los factores geomorfológicos, fallas geológicas, y precipitación. Por lo tanto, se recomienda continuar estudios más detallados que incluyan variables como la sismicidad, uso del suelo e intervención antrópica, con el fin de mejorar y aportar a la planificación territorial y evaluación de riesgos.

Palabras clave: Amenaza, Movimientos en masa, Precipitación, Susceptibilidad.

Abstract

The geographic location of the municipality of San Sebastián and the different dynamics that converge there contribute to its being affected by processes such as fracturing, erosion, and weathering, which induce the development of mass movements, a phenomenon that is very

particular in the Andean region. The present study addresses the estimation of the threat of mass movements in the municipality of San Sebastián, Cauca, Colombia, with the purpose of identifying the areas that, given their conditions, are more exposed to this type of events, which provides a basis for future research and interventions that mitigate their effects today. To do so, a mixed methodological approach is used that integrates cartographic and heuristic data, considering variables such as geology, geomorphology, slopes, soils, land cover, and precipitation. Likewise, the use of Geographic Information Systems (GIS) was employed to consolidate the final information to generate susceptibility and threat maps. The results reveal that 38% of the municipal area is highly susceptible due to agents such as geology, steep slopes, and unstable soils. Therefore, the threat increases when combined with prolonged rainfall. Thus, historical records of landslides supported the accuracy of the model and validated the cartography. The findings coincide with studies in other Andean areas, highlighting the importance of geomorphological factors, geological faults, and precipitation. Therefore, it is recommended to continue with more detailed studies that include variables such as seismicity, land use, and anthropogenic intervention to improve and contribute to territorial planning and risk assessment.

Keywords: Mass movements, Precipitation, Susceptibility, Threat.

1. Introducción

El acelerado incremento de la población urbana en las últimas décadas ocupando terrenos susceptibles a fenómenos de origen natural ha generado un considerable aumento en el número de pérdidas humanas y económicas por desastres (Changnon *et al.*, 2000; Hoppe y Pielke, 2006; Morss *et al.*, 2011, citado por Aristizábal *et al.*, 2019), como es el caso de los eventos ocurridos en países andinos, por ejemplo los flujos de detritos de Vargas, Venezuela, ocurrido en 1999, el cual dejó alrededor de 15.000 víctimas, por otro lado, la avalancha de roca y hielo/flujo de detritos de 1970 en el Nevado Huascarán, Perú que se llevó 18.000 vidas, asimismo, El lahar de

Armero, Colombia, en 1985, el cual deja aproximadamente 23.000 víctimas (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas (PMA-GCA, 2007: 19)

La evaluación de la susceptibilidad constituye el primer acercamiento para determinar el nivel de amenaza presente en una zona, implica identificar y analizar los distintos factores y condiciones que interactúan para desarrollar un evento específico, en este caso, los movimientos por remoción en masa. Estos eventos están condicionados por las múltiples variables que intervienen en el equilibrio dinámico de las pendientes, tales como, la influencia de procesos geomorfológicos, litológicos, climáticos, geotécnicos y antrópicos.

En este marco, determinar la amenaza en una zona es indispensable y a su vez, una herramienta fundamental para la ordenación del territorio, tal como lo menciona Aristizábal *et al.* (2019), porque permite reducir efectivamente las condiciones de riesgo actual, y prevenir la configuración de nuevas condiciones de riesgo. De esta manera, se puede señalar y delimitar las zonas que están más, medianamente o menos expuestas a que se presente este tipo de eventos.

Conforme a lo anterior, el territorio colombiano es uno de los países andinos que se ha visto afectado por el fenómeno de remoción en masa, debido a la geodinámica del territorio que se expresa en geoformas como montañas, llanuras, laderas, valles y mesetas, los cuales proceden, como lo menciona el Servicio Geológico Colombiano - SGC, de la interacción de tres placas tectónicas principales, tales como la Suramericana, Nazca y Caribe, lo que genera la presencia de cadenas montañosas jóvenes, que favorecen la ocurrencia de sismos, erupciones volcánicas y movimientos en masa (SGC, 2017).

Es así que en el año 2010 el Instituto Colombiano de Geología y Minería - INGEOMINAS, publica el Mapa Nacional de Amenaza Relativa por Movimientos en Masa, el cual categoriza el 63% del territorio nacional como amenaza baja, el 18% como amenaza media, el 16% en amenaza alta y finalmente el 3% en amenaza muy alta por movimiento en masa, dando evidencia a que este fenómeno puede causar múltiples daños, tanto a nivel nacional, regional y local (p 127).

De este modo, en correspondencia con los registros reportados por el Sistema de Información de Movimientos en Masa - SIMMA del SGC, desde 1900 hasta 2017, en el país se han presentado 16.969 movimientos en masa, que se han manifestado principalmente en el departamento de Antioquia, seguido de Cundinamarca y Cauca. Dentro de estos eventos de movimientos en masa, se resalta el deslizamiento de Villatina, Medellín, Antioquia, ocurrido en 1987 con 450 personas fallecidas y 1700 damnificados, el flujo de tierra de San Cayetano, Cundinamarca en 1999, donde se tuvo que evacuar y reubicar la totalidad del casco urbano, asimismo, deslizamientos múltiples: San Carlos, Antioquia en 1990 que deja 20 víctimas y 27 viviendas destruidas, entre otros (PMA-GCA, 2007).

En el caso del departamento del Cauca, según datos de la Oficina Asesora para la Gestión del Riesgo de Desastres Cauca (OAGRD, 2019) desde 1975 hasta 2018 se han reportado alrededor de 500 eventos de movimientos en masa, asociados a deslizamientos, derrumbes, flujos y caídas, los cuales han afectado a 33 municipios y más de 105.906 personas (Consejo Departamental para la Gestión del Riesgo de Desastres. En este aspecto, este departamento es la entidad donde se localiza el municipio de San Sebastián, el cual se precisa como el caso de estudio del presente artículo, teniendo en cuenta, la topografía de la zona y su interacción con el medio que lo rodea.

Este estudio tiene como objetivo principal examinar las condiciones de amenaza por movimientos en masa presentes en el municipio de San Sebastián, lo cual permite tener un acercamiento a las zonas de mayor exposición ante este fenómeno dada la información recolectada, asimismo, brinda un conocimiento previo del territorio para estudios posteriores que permitan una intervención oportuna que ayude a reducir o mitigar su impacto. Por lo tanto, para dar alcance a la investigación, se aplicó el método heurístico, el cual permitió categorizar y ponderar las variables seleccionadas para determinar la susceptibilidad y amenaza de la zona considerando su nivel de influencia en el desarrollo de movimientos en masa, de igual forma, se tiene en cuenta el registro de movimientos en masa para validar la cartografía, el conocimiento previo de expertos en el tema e información de fuentes secundarias para fortalecer el documento

y el uso de los Sistemas de información geográfico (SIG) para consolidar la cartografía final de cada punto.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

El estudio se realizó en el municipio de San Sebastián el cual se localiza al sur del departamento del Cauca, sobre la Cordillera Central del sistema montañoso de los Andes, se denomina, corazón del Macizo Colombiano o estrella fluvial, por su importancia geográfica e hídrica a nivel nacional, por desprenderse de él varias fuentes hídricas que abastecen del recurso al país, como es el caso, del río Magdalena, Patía, Cauca y Caquetá, asimismo, la cadena de lagunas, Magdalena, Santiago, Cusiyaco y Sucubúm que se encuentran ubicadas en el corregimiento de Valencia, municipio de San Sebastián, Cauca y el departamento del Huila (Alcaldía municipal de San Sebastián, 2010).

Se encuentra entre las coordenadas geográficas $1^{\circ} 50' 15''$ de latitud Norte y $76^{\circ} 46' 7''$ de longitud Oeste de Greenwich, a una distancia de la capital del departamento del Cauca de 220 kilómetros por vía carretable. Sus pendientes varían de una altura máxima de 4.080 m.s.n.m. al nororiente del municipio y una mínima de 1.380 m.s.n.m. al suroccidente, permitiendo contar con cuatro pisos térmicos: páramo, frío, templado y cálido (Alcaldía municipal de San Sebastián, 2010).

Se caracteriza por tener una topografía conformada por fuertes montañas y valles profundos que influyen en el desarrollo de deslizamientos, flujos torrenciales y de escombros, de igual forma, cuenta con el sistema de fallas geológicas que atraviesan el municipio, como el sistema de fallas Romeral que inciden en los procesos erosivos y desestabilización del terreno por estar constituido de materiales poco consolidados como depósitos volcánicos, rocas foliadas o fuertemente fracturadas y alteradas disponibles en el territorio (CMGRD, 2012)

Abarca un área de 38.900 ha que equivale a 389 km², los cuales se distribuyen en siete corregimientos; Rosal, Marmato, Paramillos, Santiago, Valencia, Venecia y San Sebastián, como se evidencia en la

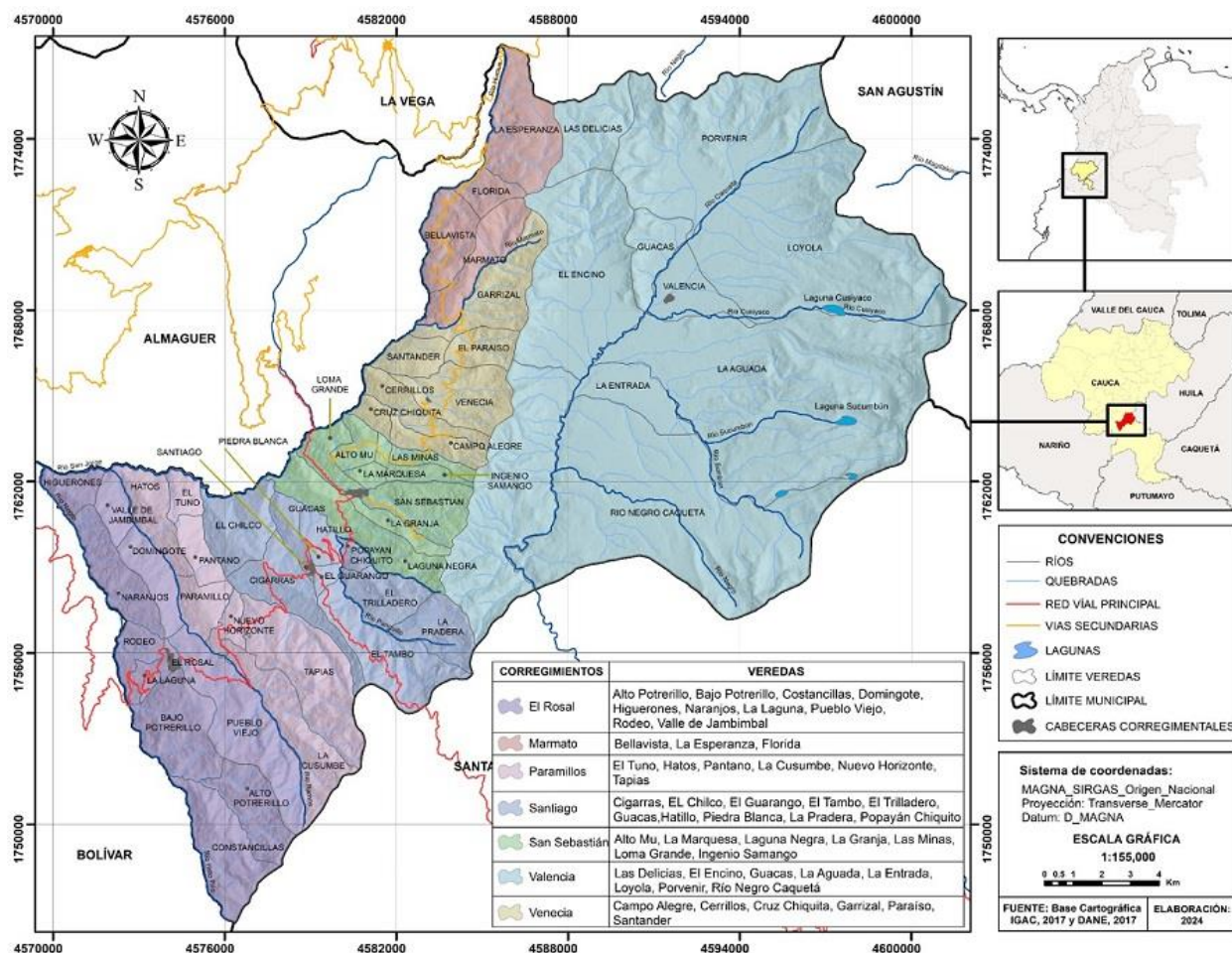


Figura 1. Asimismo, se subdividen en 50 veredas, un resguardo de la etnia Yanacona legalmente constituido y el cabildo indígena Papallaqta organizado en el corregimiento de Valencia (Alcaldía municipal de San Sebastián, 2010). El municipio cuenta con una población total de 10.948 habitantes, donde 10.280 hacen parte de los centros poblados y zona rural dispersa y 668 conforman la cabecera (Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE, 2018).

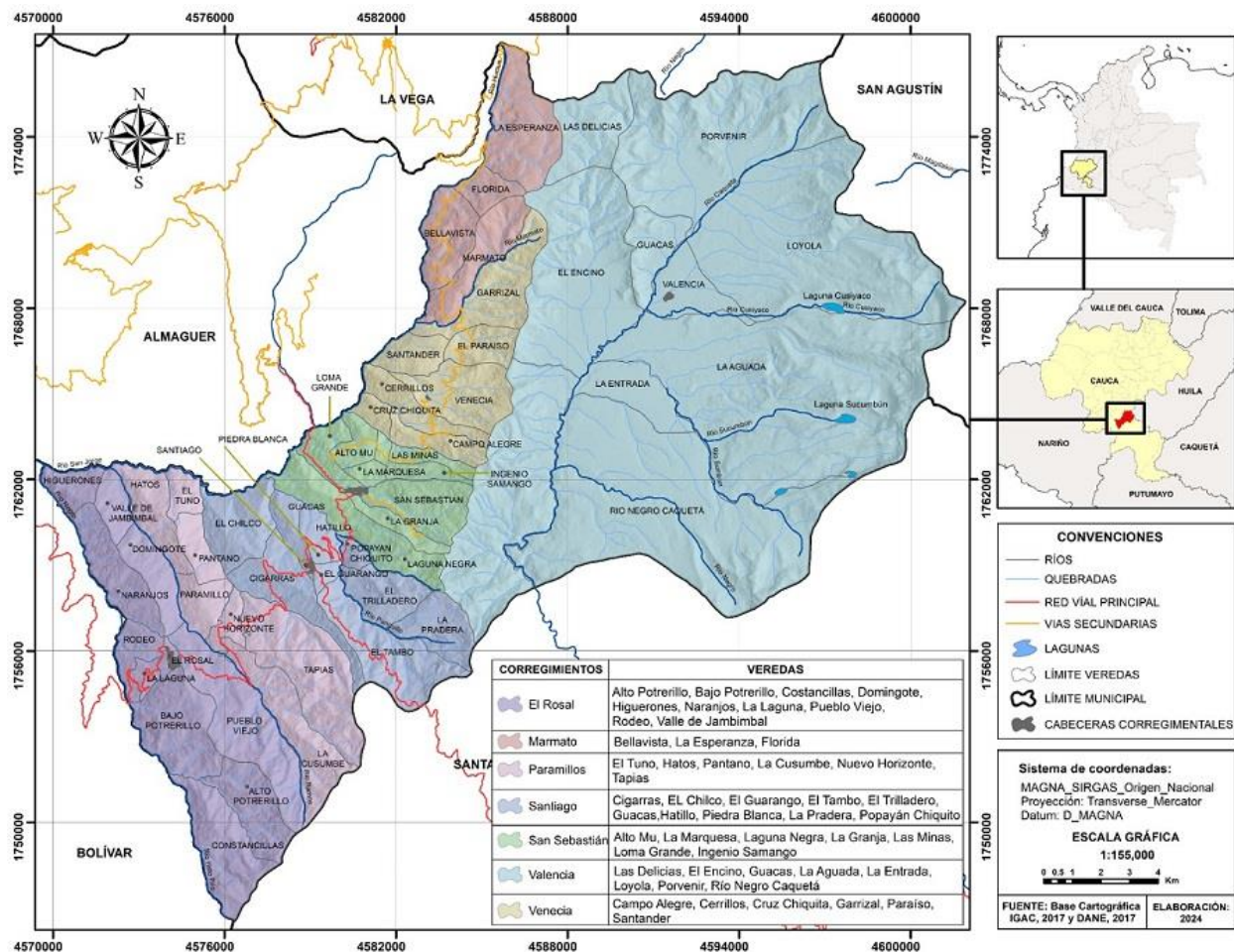


Figura 1. Localización geográfica del municipio de San Sebastián, Cauca

Fuente: elaboración propia.

Económicamente el municipio, se desenvuelve a través de la práctica agropecuaria, en la cual se cultivan productos como la papa, cebolla y ulluco que se dan principalmente en el Valle de la papas, asimismo, se siembra maíz, café, caña panelera, entre otros, que se destinan para el autoconsumo y se designan como una de las fuentes principales de ingreso de la población a lo largo y ancho del municipio, adicionalmente, se cuenta con la actividad pecuaria y la piscicultura que con el pasar del tiempo han logrado introducir niveles apreciables de tecnificación permitiendo generar mayor economía a la zona, como también es el caso de una parte del Parque Nacional Puracé por su atractivo eco turístico (Alcaldía municipal de San Sebastián, 2024).

2.1. Métodos y fuentes de datos

En el presente estudio se empleó un enfoque metodológico mixto, que dio lugar a momentos cualitativos y cuantitativos mediante la articulación de información documental y cartográfica.

En este sentido, se dispone de métodos heurísticos para asignar los pesos correspondientes a cada una de las variables utilizadas para el cálculo de la susceptibilidad y amenaza de la zona, en busca de facilitar la toma de decisiones. Por otra parte, se recurre al uso de los Sistemas de Información Geográficos como ArcGIS, para consolidar la cartografía de los distintos puntos a evaluar, permitiendo ponderar, combinar y codificar datos e información disponible en planchas, imágenes satelitales y datos vectoriales.

De este modo, el presente artículo aborda dos fases: la primera evalúa el nivel de susceptibilidad del terreno con relación a las condiciones físicas que interactúan en él, para ello, se tiene en cuenta técnicas como la ponderación de doble entrada, método AHP y conocimiento de experto. La segunda fase mide el nivel de amenaza de zona, con base al resultado final de la susceptibilidad y los agentes detonantes que intervienen en el terreno, en este caso la precipitación.

Recolección y análisis de datos

La base de datos se compone de información secundaria obtenida de diferentes entidades e institutos como el Servicio Geológico Colombiano - SGC, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, el Sistema de Información Ambiental de Colombia - SIAC, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, asimismo información construida a partir de documentos que sirvieron de apoyo en la validación y asignación de métodos apropiados para cada uno de los factores a evaluar, en este caso, la Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25.000 (SGC, 2017) y la metodología para la zonificación de susceptibilidad general del terreno a los movimientos en masa (IDEAM, 2012).

Fase 1. Cálculo de susceptibilidad

Para evaluar la susceptibilidad del terreno frente a movimientos en masa en el municipio de San Sebastián, se tuvo en cuenta el documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad general del terreno a movimientos en masa (IDEAM, 2012), el cual permite tener una base para la selección de información a trabajar, de igual forma, pautas para el procesamiento y consolidación de datos que finalmente ayudan en la elaboración de la salida grafica de la susceptibilidad.

El nivel de susceptibilidad en el municipio se estableció a partir de cinco variables: geología, geomorfología, pendientes, cobertura de Tierra y suelos. A continuación, se hace mención de cada una.

Pendientes

La variable de pendientes se obtuvo a partir del Modelo Digital de Elevación (DEM) descargado de la página web Alaska Satellite Facility, del Radar Alos Palsar, con resolución de 12,5 metros por pixel, este permitió generar las curvas de nivel del área de trabajo, a su vez, el mapa de sombras y, por último, la salida gráfica de las pendientes

Geología

La geología de la zona fue generada con información de las Unidades cronoestratigráficas a escala 1:100.000 adquirida de la base de datos del SGC (2015), de la cual se obtuvo un recorte solo de los datos que hacen parte del municipio, lo mismo que se hizo con las líneas referentes a las fallas geológicas.

Geomorfología

Desde la página web del SGC se descarga la información de la plancha 387 Bolívar, escala 1:100.000, en formato vectorial, de la cual se extraen los datos de las unidades geomorfológicas que hacen parte del contorno del municipio.

Suelos

En el reconocimiento de suelos del área de estudio, desde el Geoportal del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), se descarga los datos vectoriales del “Mapa de suelos del territorio colombiano a escala 1:100.000. Departamento: Cauca”, procediendo hacer un recorte de las unidades taxonómicas pertenecientes al municipio.

Cobertura de Tierra

Los datos de la cobertura de Tierra son extraídos del Geoportal del Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC) a escala 1:100.000, estos son procesados en el software ArcGIS 10.5 para hacer un recorte de la información que únicamente abarca el municipio de San Sebastián, la cual es utilizada para el procesamiento final.

Clasificación y ponderación de las variables

Una vez definidas las variables, se determina el nivel de importancia de cada una partiendo de la metodología heurística, desde el tipo de análisis de mapa de combinación cualitativo, donde el científico usa su criterio experto para asignar pesos a una serie de mapas parámetro (Castillo & Zúñiga, 2017), en ese marco, se utiliza el método de decisión multicriterio Analytic Hierarchy Process (AHP) para ponderar las variables seleccionadas tal como se relaciona en la tabla 1, sin embargo, este proceso se valida a través de un experto en la temática y el conocimiento propio de la comunidad que hace parte del territorio a estudiar.

Tabla 1. Pesos asignados a cada variable.

Variables	Pesos (%)
Pendiente	35
Geología	31
Geomorfología	21
Suelos	9
Cobertura de Tierra	5

Fuente: elaboración propia.

Por último, se utiliza el método de la combinación lineal ponderada o WLC por sus siglas en inglés que se caracteriza por ser un método simple para la agregación de los criterios de evaluación en un criterio de calificación. Por lo tanto, se aplica la ecuación 1, para determinar el índice de susceptibilidad a movimientos en masa (IS) que se obtiene de la suma de cada criterio de evaluación multiplicado por su respectivo peso (obtenido de la calificación AHP) (INGEOMINAS, 2010).

$$IS = \sum_{i=1}^n Ci * Vi$$

Donde, *IS* es el índice de Susceptibilidad, *n* indica el número de variables, *Ci* es el criterio de evaluación y *Vi* es el peso de cada variable.

En la cartografía de susceptibilidad obtenida, se emplea el método de clasificación estándar, que categoriza la susceptibilidad en tres rangos: alto, medio y bajo. Además, mediante el método de cuantiles, que distribuye los valores en partes iguales, se define la ponderación correspondiente a cada categoría (Tabla 2). Esta metodología sigue los lineamientos de la Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000 propuesta por el SGC (2017).

Tabla 2. Clasificación susceptibilidad.

Rango	Categoría de susceptibilidad	Color	
0,8 – 1,3	Baja	Verde	
1,3 – 1,7	Media	Amarillo	
1,7 – 2,3	Alta	Rojo	

Fuente: elaboración propia.

Validación de información

Para validar la información final de este proceso se realiza un ejercicio de calibración con los registros de deslizamientos almacenados por el SIMMA para el año 1982 – 2020 en el municipio

de San Sebastián y los datos que corresponden al inventario de movimientos en masa identificados y reportados en la plancha 387 – Bolívar, disponible en la base de datos del SGC.

Fase 2. Cálculo de amenaza

Una vez obtenida la susceptibilidad del terreno, se analizan los factores externos que pueden detonar los movimientos en masa, en este caso, la precipitación y sismicidad, que al presentarse en una zona inestable de manera prolongada o de mayor intensidad, pueden llegar a ocasionar muchos daños.

Factor detonante precipitación

La precipitación del área de estudio se determinó con datos recolectados de ocho estaciones meteorológicas; dos hacen parte del municipio de San Sebastián, como es el caso de la estación Valencia (climatológica) y Santiago (pluviométrica), las otras seis se encuentran distribuidas en municipios aledaños, tal como la estación Hidromayo, Los Milagros, El Rodeo, La Vega, Villa Fátima y Santa Rosa, esta información fue descargada de la página del IDEAM, para el periodo de lluvias de 1983 a 2019.

Estimación de datos faltantes

Teniendo en cuenta que en algunas estaciones la información de la distribución de precipitación no está completa, se procede a calcular los datos faltantes de algunos meses, aplicando el método de proporciones normales, el cual se encarga de rellenar los espacios vacíos estableciendo una razón de proporcionalidad entre la precipitación mensual y anual, como bien lo menciona Montealegre (2009) (citado por Castro & Carvajal, 2013) y se evidencia en la ecuación 3.

$$X = \frac{Pa * \bar{x}}{Pma - \bar{x}}$$

Donde, X representa la precipitación del mes faltante, Pa es la precipitación total anual del mes faltante, Pma indica la precipitación total multianual y $\bar{x}$ es la precipitación promedio del mes faltante.

En esta medida, para determinar la amenaza en la zona de estudio, se aplica la metodología heurística, mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) por medio de la herramienta algebra de mapas del software ArcGIS. Para ello, se aplica la fórmula (2) en la cual, se integran ambos factores, multiplicando el mapa final de susceptibilidad con el resultado del factor condicionante por el valor porcentual asignado y a su vez, se suma ambos productos.

$$A = \sum [(IS * Pe1) + (FD * Pe2)]$$

Donde, Is es el índice Susceptibilidad, Pe1 indica el peso de la susceptibilidad, FD es el factor detonante y Pe2 es el peso del factor detonante.

El resultado final de este proceso se clasifica en amenaza alta, media y baja según la propuesta metodológica del SGC (2017), de este modo, se tiene la salida grafica de la amenaza por movimientos en masa en el municipio de San Sebastián, Cauca.

3. Resultados

3.1. Evaluación de la susceptibilidad del terreno

A continuación, se presenta la evaluación de la susceptibilidad del terreno teniendo en cuenta las variables seleccionadas, en este caso pendiente, geología, geomorfología, suelos y cobertura de la tierra.

Descripción de variables

En el procesamiento de cada una de las variables, se determina que el 43% de las pendientes que hacen parte de la zona de estudio, corresponden a un rango abrupto de 19 a 40°, lo que contribuye a que haya una alta tendencia a generar movimientos en masa debido a su inclinación, asimismo, se cuenta con pendientes muy inclinadas de 11 a 19° que abarcan 9336, 85 ha, es decir, el 22% del área total del municipio, indicando una moderada tendencia a presentarse este tipo de eventos. Por otro lado, se tiene también pendientes menores a 7°, de 7 a 11° y mayor a 40° que influyen en el municipio, pero se presentan en menor proporción.

En cuanto a la geología, el Complejo Quebradagrande es la unidad cronoestratigráfica que predomina en la zona de estudio, ocupando 12967,67 Ha (31%), seguido de los Depósitos volcánicos no diferenciados con un 21% y el Complejo Arquía con 7690,71 Ha (18%). En este sentido, los compuestos que hacen parte de estas y otras unidades que están disponibles en el municipio, son propensos a la desestabilización del terreno y a la posible presencia de deslizamientos, debido a procesos de meteorización que se dan en la zona al estar condicionada por el Sistema de Fallas Romeral, como es el caso de los esquistos, que al ser una roca foliada con alto contenido de Mica tiende a ser menos resistente, por otro lado, está la cuarcita y neis, anfibólicos y sericíticos, entre otros.

Para el caso de la geomorfología, se cuenta con cinco ambientes morfogénicos: denudacional, estructural, fluvial, glacial y volcánico, donde, la unidad sierra denudada que hace parte de procesos erosivos predomina a nivel municipal ocupando 7594,10 Ha, es decir, el 18% de las 35 unidades presentes, lo que conlleva a que estas zonas por tener pendientes muy pronunciadas y una morfología montañosa y elongada de laderas largas, estén más propensas a verse afectadas por procesos de erosión acentuada en sustratos ígneos y metamórficos tal como lo manifiesta el SGC y Universidad Nacional de Colombia – UNAL, (2013), por otro lado, se tiene flujo lahárico aterrazado, flujo glacial, lomo denudado bajo de longitud larga, ladera erosiva, entre otros.

Los suelos predominantes en la zona de estudio, están representados por la Asociación: Typic Hapludands; Typic Fulvudands; Andic Dystrudepts; Afloramientos rocosos con el 36,9% y la Asociación: Acrudoxic Fulvudands; Pachic Fulvudands; Typic Hapludands con 31,6%, estos son suelos que presentan condiciones aptas para el drenaje y se desarrollan a partir de cenizas volcánicas que en unos casos cubren total o parcialmente rocas ígneas o materiales metamórficos, como las diabasas, andesitas, filitas, entre otros, asimismo, su profundidad tiende a variar de profundos, moderadamente profundos a superficiales, sin embargo, son propensos a la presencia de procesos erosivos u erosión hídrica que desencadenan movimientos en masa, lo cual genera impactos recurrentes en el municipio.

Dentro de las coberturas de tierra que predominan en el municipio, el bosque denso tiene mayor representatividad en la zona al ocupar el 28% del total de coberturas presentes, es decir, 11847,53 ha, lo que indica buena presencia arbórea y por ende buen balance del recurso hídrico para su conservación, el cual es representativo en la zona. Asimismo, está el mosaico de pastos con espacios naturales (16%), pastos limpios (14%) herbazal (13%) y en menor proporción pastos enmalezados (2%), mosaico de cultivos con espacios naturales (2%), bosque fragmentado (2%) y bosque de galería y ripario (1%), lo que denota, un uso de suelo heterogéneo y medianamente equilibrado al contemplar formaciones naturales y otras destinadas para la producción agrícola y pecuaria.

Teniendo consolidada la información de cada una de las variables que intervienen en la zona para que esta sea susceptible, se corre el modelo espacial aplicando el método de combinación lineal ponderada, del cual se obtiene como resultado una susceptibilidad alta, media y baja a nivel municipal tal como se representa en la figura 2.

En el municipio de San Sebastián, la susceptibilidad alta se encuentra en mayor extensión, abarca el 38% del área total, es decir, 15.945 ha las cuales se distribuyen principalmente hacia la zona sur, comprendiendo las veredas que hacen parte del corregimiento del Rosal, Paramillos y Santiago; asimismo, veredas que se encuentran al occidente del municipio y conforman el corregimiento de San Sebastián, Venecia y Marmato. Por lo tanto, el estado de la zona permite que haya mayor incidencia de movimientos en masa por la inestabilidad del terreno, al contar con un sistema de fallas que lo atraviesa, en esta instancia falla Silvia-Pijao, Las Estrellas, Las Animas, entre otras, que crean rupturas o fracturamiento en los compuestos que conforman la litología, en este caso, depósitos que son poco consolidados y que estructuralmente son inestables por tener una baja resistencia, alto fracturamiento y baja cohesión interna. Adicionalmente, una topografía conformada por fuertes montañas de carácter volcánica estructural erosional y estructural erosional, de igual forma, pendientes mayores a los 20 grados y coberturas de tierra de pastos enmalezados y mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales.

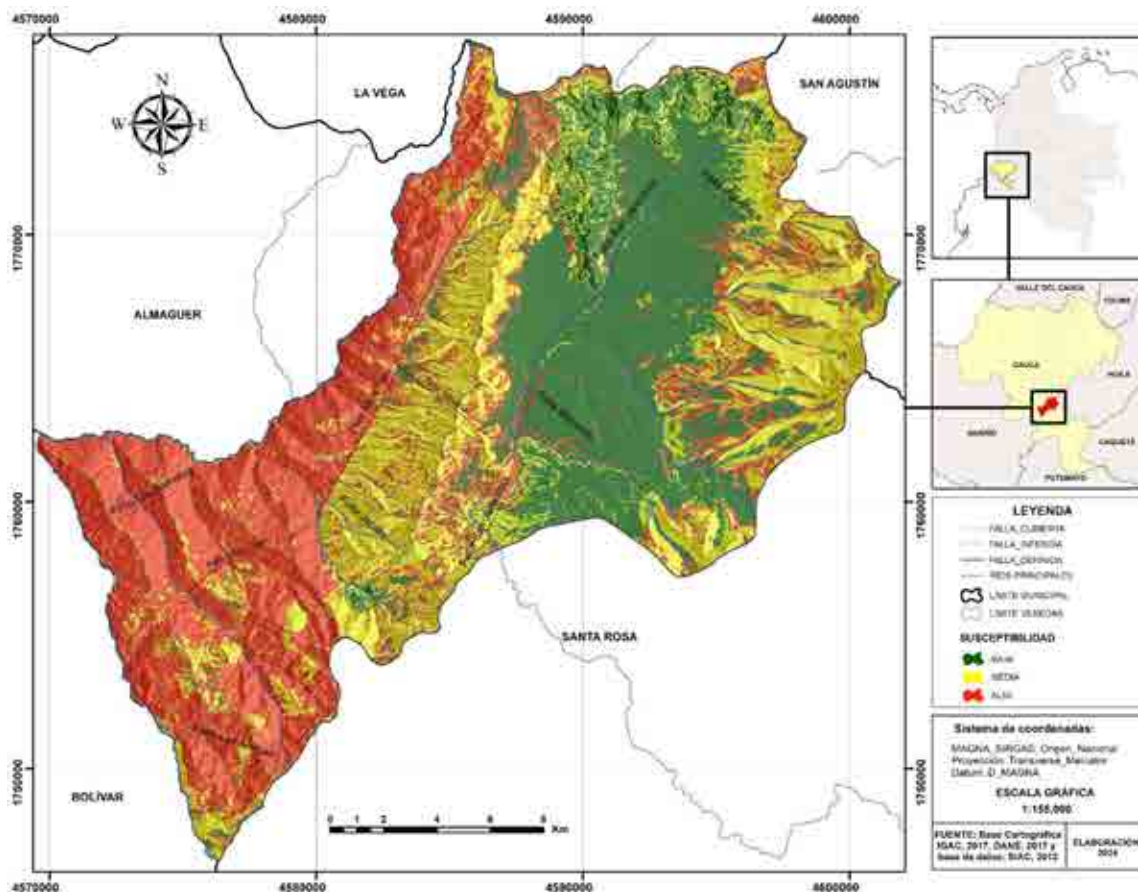


Figura 2. Susceptibilidad por movimientos en masa en el municipio de San Sebastián.

Fuente: elaboración propia.

La susceptibilidad media comprende 12.635 ha que equivalen al 30% del área total, se encuentra disponible principalmente en el centro y nororiente del municipio, cubriendo una parte del corregimiento de Santiago, San Sebastián, Venecia, Marmato y Valencia. Esta zona se caracteriza por tener pendientes inclinadas a abruptas con tendencia moderada a generar movimientos en masa, asimismo, cuenta con suelos moderadamente profundos a superficiales, un buen drenaje y texturas moderadamente gruesas. La cobertura disponible son bosques de galería y ripario, además de bosques fragmentados y arbustales.

La susceptibilidad baja se localiza en mayor medida en el corregimiento de Valencia y veredas que lo componen, ocupa el 33% del área total que corresponde a 13.754 ha, donde la inclinación

de las pendientes son planas a suavemente inclinadas, los suelos tienden a ser profundos a muy profundos, con un buen drenaje y texturas moderadamente gruesas y gruesas. Los ambientes que predominan en la zona son de tipo fluvial y volcánico, como la llanura de inundación, abanicos fluvio torrenciales, flujos laháricos aterrazados y escarpes de flujos laháricos aterrazados. La figura 3 representa los niveles de susceptibilidad por movimientos en masa mencionados anteriormente.

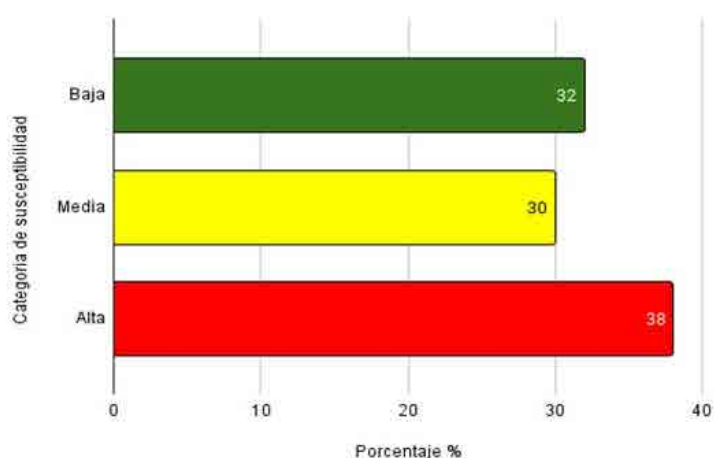


Figura 3. Categoría de susceptibilidad.

Fuente: elaboración propia.

Validación del modelo

La susceptibilidad por movimientos en masa al ser una representación de las condiciones de la zona, permiten determinar la fragilidad o grado de afectación que puede tener un terreno por las diferentes dinámicas que en él convergen, por ende, al contar con la información de eventos ya desarrollados y contrastarla con este modelo se puede inferir si el resultado es certero y se acerca a la realidad del territorio.

Inventario de Movimientos en masa

Mediante el cruce de información de los eventos reportados por el SIMMA y la plancha 387 – Bolívar del SGC, se aprecia que en el área de estudio se han presentado diversos deslizamientos

los cuales se localizan principalmente sobre terrenos con pendientes fuertes, lo que conlleva a una fragmentación en la zona por daños ocasionados en las viviendas, cultivos y población misma, tal como lo afirman habitantes del municipio que estuvieron en el acompañamiento para el reconocimiento de la zona y de igual forma los que aportaron en las entrevistas realizadas.

Se utilizaron métodos y herramientas de investigación social, concretamente se aplicó una encuesta acompañada de un taller de cartografía social para la recolección de información y para la sistematización de la representaciones e imaginarios de la comunidad sobre este fenómeno. Los resultados evidencian que la presencia de los derrumbes, deslizamientos o movimientos en masa en la zona, se debe a la inestabilidad del terreno, a las fuertes lluvias que se han ido presentando con el tiempo, la intervención antrópica sobre el suelo, en este caso para el regadío de cultivos, tala de bosque, canalización de aguas sin normas técnicas, construcciones indebidas, entre otros, lo que ha generado, pérdida de banca, derrumbes sobre bocatomas que abastecen de agua a las veredas, daños en las vías, fisuras o agrietamientos en las viviendas e incluso la muerte de uno de sus habitantes.

En la tabla 3 se presentan los resultados correspondientes al reporte del SIMMA y la validación de la comunidad.

Tabla 3. Inventario de movimientos en masa.

Inventario de movimientos en masa			
Fecha de evento	Latitud	Longitud	Tipo de movimiento
01/01/1982	1° 51' 57.91"	-76° 42' 24.14"	Deslizamiento
22/01/1982	1° 57' 36.59"	-76° 41' 56.2"	Deslizamiento
07/01/1998	1° 51' 57.91"	-76° 42' 24.14"	Deslizamiento
12/01/2000	1° 51' 57.91"	-76° 42' 24.14"	Deslizamiento
14/03/2000	1° 50' 20"	-76° 46' 7"	Deslizamiento
14/04/2000	1° 51' 57.91"	-76° 42' 24.14"	Deslizamiento
23/05/2000	1° 51' 57.91"	-76° 42' 24.14"	Deslizamiento
2/11/2000	1° 51' 57.91"	-76° 42' 24.14"	Deslizamiento
15/01/2004	1° 51' 57.91"	-76° 42' 24.14"	Deslizamiento
10/01/2008	1° 51' 57.91"	-76° 42' 24.14"	Deslizamiento
01/08/2008	1° 51' 57.91"	-76° 42' 24.14"	Deslizamiento
30/04/2010	1° 54' 47"	-76° 42' 30"	Deslizamiento

06/05/2010	1° 48' 0"	-76° 49' 48"	Deslizamiento
01/06/2010	1° 43' 12"	-76° 48' 0"	Deslizamiento
3/12/2010	1° 50' 18"	-76° 46' 7"	Deslizamiento
16/01/2011	1° 48' 36"	-76° 48' 36"	Deslizamiento
01/04/2020	1° 46' 41.87"	-76° 45' 19.06"	Deslizamiento
14/05/2020	1° 47' 6"	-76° 45' 54"	Deslizamiento

Fuente: elaboración propia con datos del SGC – SIMMA, (2022).

Superponiendo el modelo final de la susceptibilidad con la capa de la distribución de los deslizamientos a nivel municipal se ratifica que los puntos de muestreo tienen correspondencia con las zonas calificadas como alta y medianamente susceptibles ante este tipo de eventos, de igual forma, aquellas que no lo han estado, pero que debido a las condiciones del sitio podrían verse afectadas, por lo tanto, hay consistencia en la información final como se representa en la Figura 4, en esta medida este resultado es pertinente y puede ser referencia para futuras investigaciones.

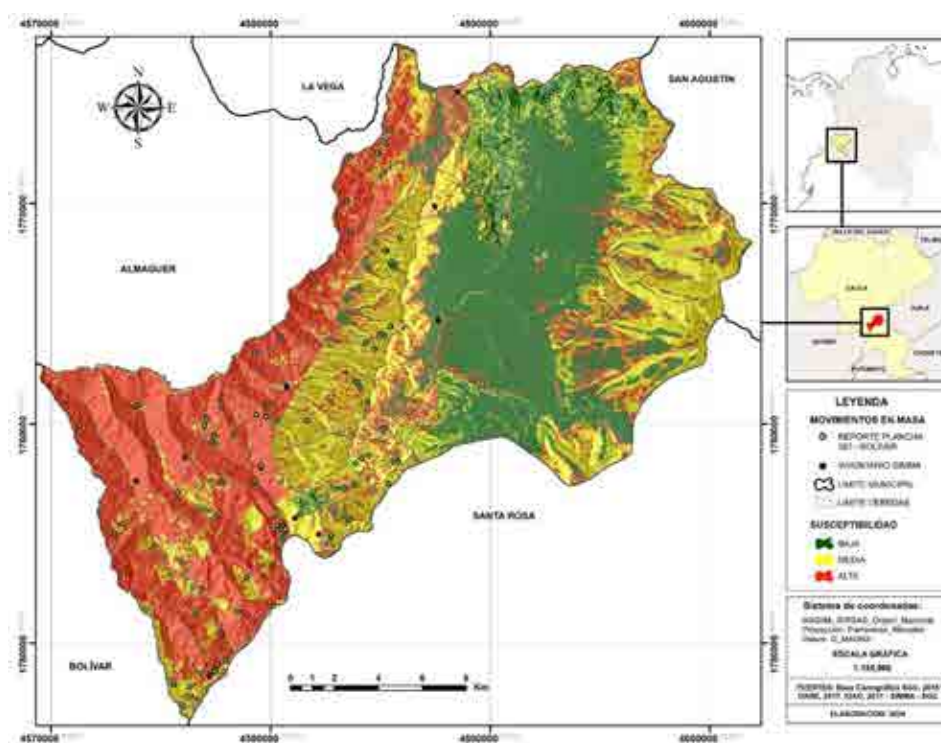


Figura 4. Relación mapa de susceptibilidad y eventos históricos de movimientos en masa

Fuente: elaboración propia

3.1. Evaluación de la amenaza

En la evaluación de la amenaza por movimientos en masa se reconocen como factores detonantes principales los sismos y las precipitaciones, ello permite reconocer que sumado a las condiciones de contexto puede darse lugar a la presencia de factores que resultan activadores del fenómeno estudiado, en este sentido se consideró el estudio solo con el factor detonante precipitación dado que este cuenta con información detallada de las lluvias presentes en la zona por un periodo de tiempo determinado, para el caso del detonante sismo, la información disponible no está a detalle sino generalizada, por lo tanto, no es posible diferenciar los distintos valores de aceleración en el área de estudio, y de este modo, obtener resultados favorables en la estimación de la amenaza.

Descripción de variables

De acuerdo con la información obtenida de las ocho estaciones meteorológicas, se determina que el periodo que mejor se ajusta al análisis de distribución de la precipitación en el área de estudio es a partir de 1983 a 2019, teniendo en cuenta, que el porcentaje de datos faltantes es bajo, por lo tanto, el ajuste con el método de proporciones normales fue mínimo.

En este sentido, relacionando los datos de cada una de las estaciones se aprecia dos regímenes de lluvia, el primero se trata del régimen de lluvia unimodal, que consta de un solo periodo de lluvias a nivel regional y se presenta en la estación Valencia ubicada en el municipio de San Sebastián y en la estación Villa Fátima localizada en San Agustín, Huila. De igual forma, se cuenta con el régimen de lluvia bimodal, donde hay regiones con dos periodos de lluvia, en ese caso, la estación Santiago, disponible en el área de estudio, asimismo, la estación Hidromayo Camp, Los Milagros, La Vega, El Rodeo y Santa Rosa, las cuales están instaladas en el área circundante al municipio.

En este marco, los valores promedios de lluvia de la estación Valencia tienden a variar entre los 78,7 mm/mes y 98,6 mm/mes, no obstante noviembre es el mes con mayor incremento en la precipitación con 121,2 mm/mes y septiembre el mes más seco con 56,4 mm/mes, tal como se

representa en la tabla 4, la cual recopila la información final de la precipitación mensual y anual de las estaciones trabajadas.

Por otra parte, la estación Santiago presenta valores promedios de precipitación que están entre 25,7 mm/mes, es decir, el valor más bajo y 198,2 mm/mes valor de mayor incremento, en esta instancia, la zona tiene un periodo seco que va desde el mes de junio a septiembre y dos periodos lluviosos, entre enero a mayo y de octubre a diciembre.

De este modo, la precipitación de las demás estaciones meteorológicas también tiende a variar como las mencionadas anteriormente, sin embargo, presentan el mismo régimen de lluvia (unimodal o bimodal).

Tabla 4. Precipitación promedio mensual y anual en mm.

Mes	Hidromayo Camp	Los Milagros	El Rodeo	Santiago	Valencia	La Vega	Villa Fátima	Santa Rosa
Ene	142,8	159,4	141,1	133,2	78,7	111,1	95,1	92,6
Feb	116,5	131,9	123,6	121,6	75,8	102,9	103,7	105,7
Mar	143,2	152,5	161,7	108,9	86,5	105,5	119,4	136,0
Abr	148	154,8	184,8	98,4	103,0	121,4	164,6	195,4
May	100,6	109,1	124,7	71,2	95,9	74,5	170,4	253,2
Jun	36,6	41,5	46,1	38,7	93,3	32,8	191	284,5
Jul	20,1	24,7	28,0	37,4	107,9	26,0	160,8	267,1
Ago	14,5	18,8	22,9	25,7	74,8	16,1	126,6	203,7
Sept	56,5	54,7	68,8	38,2	56,4	44,3	102,9	159,9
Oct	171,4	184,2	211,0	150,3	107,3	157,5	116,4	154,1
Nov	231,8	234,0	264,7	198,2	121,2	180,2	151,0	133,8
Dic	163,0	191,8	182,3	168,5	98,6	144,7	109,9	98,6
Anual	1344,9	1457,4	1559,7	1190,4	1099,5	1117,1	1611,8	2075,6

Fuente: elaboración propia con datos del IDEAM periodo 1983-2019.

Por lo expresado anteriormente, los datos recopilados en la tabla 4 permitieron generar el mapa de precipitación media anual a nivel municipal (Figura 5), en el cual se evidencia tres zonas con distintos niveles de precipitación. En el primer caso, las precipitaciones oscilan entre 1.049 milímetros a 1.191 milímetros anuales, presentándose en el 51% del territorio, principalmente hacia el occidente del corregimiento de Valencia que se caracteriza por pendientes de baja

inclinación, asimismo, Marmato, Venecia y algunas veredas que componen el corregimiento de San Sebastián, Santiago y Paramillos.

Por otro lado, están las precipitaciones que oscilan entre 1.191 mm a 1.333 mm anuales, abarca el 36% del área de estudio y se da sobre zonas que pueden ser muy factibles a desarrollar movimientos en masa, debido a las condiciones del terreno, nivel de inclinación de las pendientes, componentes del suelo, entre otros.

Finalmente, están las precipitaciones que tienen menor presencia porque ocurren en el 13% del municipio, sin embargo, son causales para que se generen múltiples daños en el territorio y en la población misma, de este modo, estas oscilan entre 1.333 mm a 1.475 mm anuales y se detonan principalmente al sur y oriente del corregimiento del Rosal, de igual forma, se dan al oriente del corregimiento de Valencia, específicamente en el límite que conecta con el municipio de Santa Rosa.

En este contexto, es importante resaltar que si estas precipitaciones se presentan de manera prolongada, inducen variaciones freáticas, debido a que saturan niveles profundos del terreno y facilitan el desencadenamiento o la reactivación de grandes inestabilidades, con superficies de rotura profundas. De igual forma, si estas son intensas de corta duración también pueden ser un agente que produzca inestabilidad superficial (Mergili et al., 2015), tal como se ha observado en algunas partes del municipio donde se han presentado deslizamientos a causa de las precipitaciones.

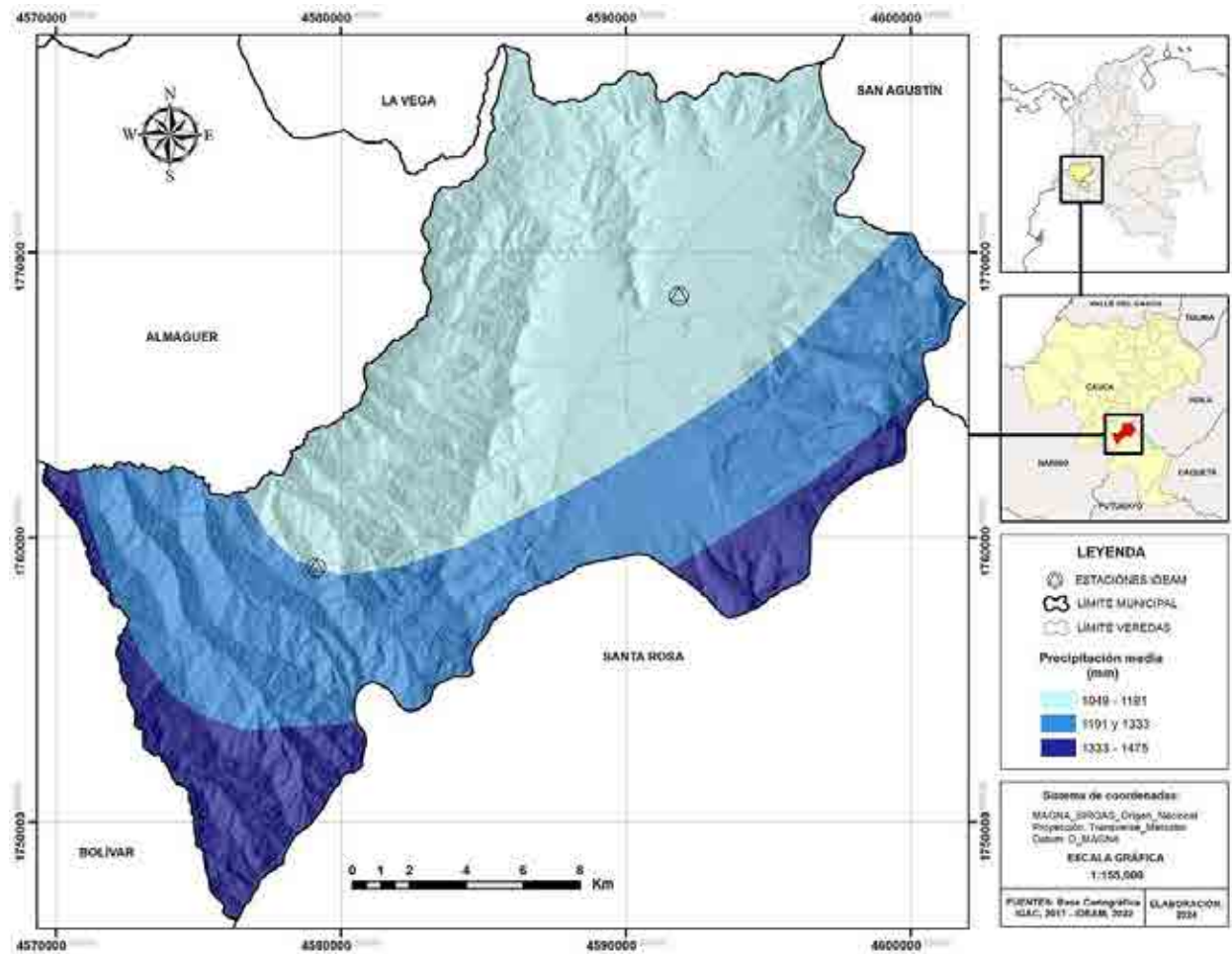


Figura 5. Precipitación media anual periodo 1983 – 2019.

Fuente: elaboración propia.

Escenarios de la amenaza

Con base en el estudio propuesto, la amenaza por movimientos en masa presente en el municipio de San Sebastián, se definió a partir de la superposición del resultado final de la susceptibilidad y el factor detonante precipitación.

En este orden de ideas, a ambas capas se les asignó un peso de acuerdo a su importancia en la zona y la experiencia de algunos investigadores consultados, de este modo, la susceptibilidad cuenta con un peso del 70% debido a las dinámicas presentes en el territorio, como las

modificaciones que se han dado en el relieve a causa de procesos geológicos, pendientes del terreno, componentes del suelo, coberturas de tierra presentes y en ciertas partes la acción antrópica. Por otro lado, la precipitación recibió un peso del 30% porque a pesar de que este agente es de gran importancia para que se desarrolle un movimiento en masa, su actuar en el terreno no es constante y los niveles de pluviosidad no han sido reiteradamente altos para que se detonen fácilmente este tipo de eventos en esta zona.

Una vez realizado este procedimiento, se tiene como resultado el mapa de amenaza, el cual fue categorizado en tres rangos, alto, medio y bajo como se representa en la figura 6, por lo tanto, la información final se validó en campo con los mismos habitantes que hacen parte de este territorio y de igual forma con datos que estos aportaron de zonas donde se han presentado deslizamientos y otras donde pueden estar sujetas a este fenómeno por el grado de saturación presente en el suelo, grietas en el terreno, hundimientos, entre otros.

En este contexto, la amenaza alta en el municipio se encuentra en menor extensión, ocupa el 31% del área total, es decir, 12933,54 ha que están distribuidas principalmente hacia el occidente y una parte del sur oriente de San Sebastián. Por lo tanto, cubre gran parte de las veredas que conforman el corregimiento del Rosal y Marmato, asimismo, algunas veredas del corregimiento de Paramillos, Santiago, San Sebastián y Venecia, no obstante, se presenta en Valencia, pero en menor proporción.

De acuerdo a lo anterior, las zonas con este nivel de amenaza, se encuentra en terrenos alta y medianamente susceptibles, por estar sobre ambientes morfogenéticos de tipo estructural y denudacional, lo cual indica la formación de posibles procesos erosivos y por ende afectaciones sobre los suelos. Por otro lado, la presencia de fallas geológicas genera gran impacto sobre la litología de la zona, al incidir negativamente sobre la desestabilización de los taludes, puesto que algunos de los compuestos que hacen parte de estas unidades son de baja resistencia, así que, están más sujetos a los daños o deformaciones, como es el caso de los esquistos que conforman el Complejo Arquía. Asimismo, se presentan pendientes de gran inclinación que han reducido la estabilidad de la zona, a causa de procesos de meteorización sobre las rocas presentes, lo cual

ha producido un arrastre de este material y por ende mayor exposición de la roca a agentes como las precipitaciones, el viento, la temperatura y humedad del aire. Lo anterior es un ejemplo de la articulación de los procesos de contexto geológico de esta zona con la presencia de agentes activadores, en este caso, las precipitaciones.

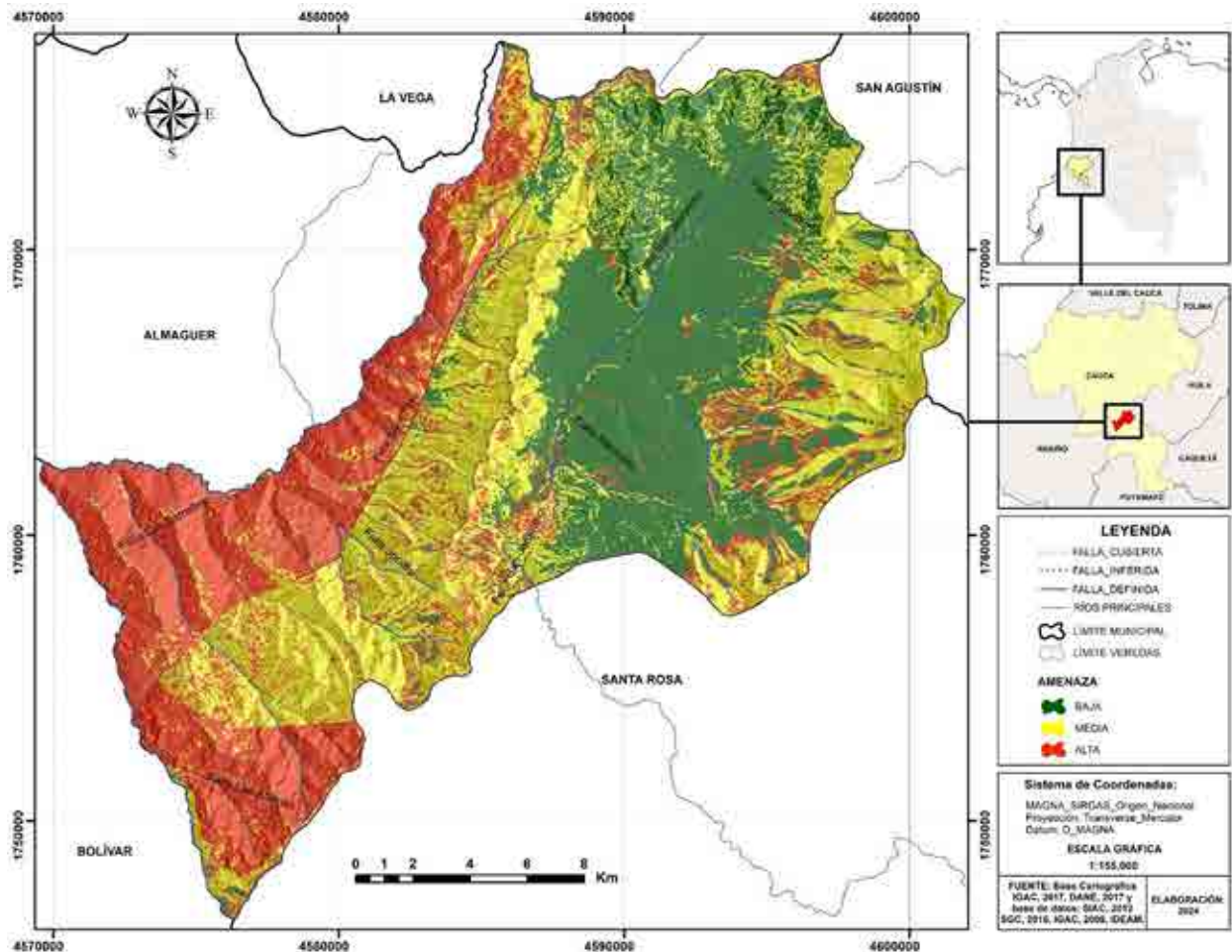


Figura 6. Amenaza por movimientos en masa en el municipio de San Sebastián.

Fuente: elaboración propia.

La amenaza media abarca 15454,91 ha que equivale al 37% del área total, está distribuida hacia el centro, suroriente y pequeñas áreas del nororiente y occidente del municipio de San Sebastián, por ende, cubre parcialmente las veredas que conforman el corregimiento del Rosal como es el

caso de Pueblo Viejo y Constancillas, asimismo, veredas del corregimiento de Paramillos, Santiago, San Sebastián, Venecia, Valencia y en menor extensión Marmato. En este sentido, las zonas con este nivel de amenaza se caracterizan por tener pendientes entre 11° y 50° de inclinación, lo cual es propicio para el desarrollo de movimientos en masa, sin embargo, pueden estar medianamente controlados por las coberturas de tierra presentes y uso del suelo mismo. Adicionalmente, está presente el Complejo Quebradagrande, que si bien, tiene suelos menos cohesivos lo cual ayuda a que haya menor retención de agua, sin embargo, la presencia de fallas puede generar inestabilidad debido a la posible meteorización presentada sobre las rocas del sitio.

Por último, la amenaza baja ocupa el 32% del área total del municipio, es decir, 13419,83 ha que se disponen principalmente en las veredas que conforman el corregimiento de Valencia, como es el caso de Río Negro Caquetá, Valencia, Guacas y Porvenir, asimismo, en pequeñas áreas del corregimiento de Santiago, Venecia y Marmato. Este nivel de amenaza coincide con zonas de baja pendiente, por lo tanto, la presencia de deslizamientos tiende a ser nula a baja, debido a los compuestos y resistencia del terreno ante agentes externos.

4. Discusión

Los resultados obtenidos en relación con el análisis de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa en el municipio de San Sebastián, coincide con diversas investigaciones realizadas en regiones montañosas de los Andes donde las características geológicas y geomorfológicas cumplen un papel trascendental en la generación de movimientos en masa, tal es el caso, de los estudios realizados por (Aristizábal et al., 2019; SGC, 2017) donde la topografía abrupta de la zona y, a su vez, la presencia de fallas geológicas fueron factores determinantes en la inestabilidad del terreno.

En este sentido, la susceptibilidad alta localizada en el 38% del área total de estudio, coincide con lo anteriormente mencionado, donde las pendientes pronunciadas y naturaleza de los materiales geológicos presentes son determinantes para la generación de estos eventos, de igual forma, la

presencia de fallas geológicas donde la litología está propensa a la meteorización y fracturamiento por compuestos como los esquistos.

Asimismo, la precipitación como factor desencadenante es consistente con lo reportado por Mergili et al. (2015), quienes acentúan que las lluvias prolongadas y de alta intensidad son un factor crítico en la reactivación de inestabilidades en terrenos previamente vulnerables. En este contexto, la precipitación promedio mensual de las estaciones meteorológicas del municipio presentan una variabilidad, donde muestran valores máximos de hasta 121,2 mm/mes en noviembre, lo cual refuerza la correlación entre los deslizamientos reportados y los eventos de lluvias intensas.

Con respecto a la validación de los modelos de susceptibilidad y amenaza, los deslizamientos históricos reportados por el SIMMA y el SGC tienen gran correspondencia con las áreas de alta susceptibilidad identificadas, lo que corrobora el acierto de los modelos propuestos, tal es el caso, de la eficacia de los modelos heurísticos y análisis multicriterio como el Analytic Hierarchy Process (AHP) utilizados y recomendados en los estudios metodológicos previos de zonificación de susceptibilidad en Colombia (IDEAM, 2012).

Por otra parte, se considera pertinente que para futuros estudios se incorpore factores detonantes, como la sismicidad, la cual no pudo incluirse en este análisis debido a la falta de datos locales. Es así que la integración del factor sismo en la zona podría mejorar considerablemente la evaluación del riesgo. Asimismo, es importante generar estudios más exhaustivos sobre los cambios en el uso del suelo y la influencia de la actividad antrópica en la susceptibilidad a movimientos en masa, tal cual lo sugiere Castillo & Zúñiga (2017) en sus estudios de análisis de coberturas de tierra.

En síntesis, los resultados de esta investigación no solo se ajustan a la literatura existente, sino que también aporta al conocimiento sobre los movimientos en masa en zonas andinas, generando datos valiosos para la gestión de riesgos del municipio de San Sebastián y áreas similares.

5. Conclusiones

El presente estudio permitió tener un acercamiento a la amenaza por movimientos en masa en el municipio de San Sebastián, lo cual fue propicio para establecer las zonas que dada sus condiciones físicas están más expuestas al desarrollo de este tipo de eventos, del mismo modo, reconoce la influencia del factor precipitación para que estos se detonen y de alguna forma impacten a la población.

De la cartografía elaborada se pudo contemplar que el 38% del área total del municipio responde a niveles altos de susceptibilidad, lo cual está orientado principalmente a la inclinación de sus pendientes, por estar mayormente por encima de los 15 grados, es decir, inclinadas, muy inclinadas a abruptas, asimismo, se atribuye a las discontinuidades presentes en terreno por la incidencia litológica de la zona que con el tiempo han generado diferentes rupturas sobre los taludes como es el caso del Sistema de Fallas Romeral que atraviesa gran parte del municipio, asimismo, los cambios en la cobertura de la tierra, a causa de la intervención antrópica por el uso indiscriminado o intromisión con cultivos que se han ido instalando con el tiempo.

Si bien lo anterior permite conocer las condiciones del terreno y los factores que inciden para que este sea susceptible, la información obtenida por el SIMMA, Servicio Geológico Colombiano y población misma, fue un importante insumo para correlacionar y a su vez, validar la cartografía elaborada, sin embargo, es indispensable que a nivel municipal se consolide un registro oficial de los movimientos en masa que se han desarrollado hasta el momento.

Por otro lado, contar con la distribución de la precipitación en un periodo de 36 años (1983 a 2019) permite reconocer las zonas en estado de amenaza, dado el factor detonante que incide sobre el terreno, por lo tanto, es factible para este caso, realizar un estudio a detalle que permita intervenir activamente sobre la población que sea susceptible a estos procesos.

Los resultados obtenidos en este estudio son de gran aporte al municipio, porque posibilita identificar las zonas más vulnerables frente a estos eventos. Asimismo, es pertinente para la gestión del riesgo y planificación territorial en zonas donde la geología, topografía y factores

climáticos, tiene gran incidencia a presentar movimientos en masa. Por lo tanto, facilita la toma de decisiones para implementar medidas de mitigación o planes de contingencia más efectivos que permitan prevenir futuros desastres, sin embargo, es necesario que en futuras investigaciones se genere una cartografía más detallada como es el caso de variables como la geomorfología, geología, cobertura de tierra y geotecnia.

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

6. Referencias

Alcaldía Municipal de San Sebastián. Esquema de Ordenamiento Territorial – municipio de San Sebastián (2010). <https://www.yumpu.com/es/document/read/15580800/capitulo-2-corporacion-autonoma-regional-del-cauca>

Alcaldía Municipal de San Sebastián Cauca (2024). *Plan de Desarrollo Municipal 2024-2027*.

https://alcaldia-de-san-sebastian-cauca.micolombiadigital.gov.co/sites/alcaldia-de-san-sebastian-cauca/content/files/000546/27275_pdt-ss-202427.pdf

Aristizábal, E., López, S., Sánchez, O., Vásquez, M., Rincón, F., Ruiz-Vásquez, D., Restrepo, S., y Valencia, J. S. (2019). Evaluación de la amenaza por movimientos en masa detonados por lluvias para una región de los Andes colombianos estimando la probabilidad espacial, temporal y magnitud. *Boletín de Geología*, 41 (3), 85-105. <https://doi.org/10.18273/revbol.v41n3-2019004>

Castillo Gonzáles, M., & Zúñiga, G. (2017). *Elementos para el análisis del riesgo por movimientos en masa en el sector “El Campito” del municipio Santander de Quilichao* [Tesis de pregrado]. Universidad del Valle.

Castro Llanos, D.A. y Carvajal Escobar, Y. (2013). Análisis de tendencia en la precipitación pluvial anual y mensual en el departamento del Valle del Cauca. *Memorias*, 11 (20), 9-17.

Changnon, S., Pielke, R.J., Changnon, D., Sylves, R., y Pulwarty, R. (2000). Human factors explain the increased losses from weather and climate extreme. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81 (3), 437 – 442.

Consejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres - CMGRD (2012). *Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres de San Sebastián*. <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/458/PMGR%20San%20Sebastian.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE (2018). *DANE - Censo Nacional de Población y Vivienda 2018*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018>

Hoppe, P. and Pielke Jr., R. A.: Workshop Summary Report, in: " Workshop on Climate Change and Disaster Losses: Understanding and Attributing Trends and Projections, edited by: Hoppe, P. and Pielke Jr., R. A., Hohenkammer, Germany, 4–12, 2006. http://sciencepolicy.colorado.edu/sparc/research/projects/extreme_events/munich_workshop/in

Instituto Colombiano de Geología y Minería - INGEOMINAS (2010). *Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa, Escala 1:500.000*. <https://recordcenter.sgc.gov.co/B8/21003050024427/Documento/Pdf/2105244271101000.pdf>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM (2012). *Metodología para la zonificación de susceptibilidad general del terreno a los movimientos en masa*. Bogotá D.C. http://www.ideam.gov.co/documents/11769/152732/Metodologia+suscept+FRM_oficial_final.pdf/6ded04e2-9378-440f-8902-2e6c92fcc745

Mergili, M., Santiago, C. I. M., y Moreiras, S. M. (2015). Causas, características e impacto de los procesos de remoción en masa, en áreas contrastantes de la región Andina. *Cuadernos de Geografía Revista Colombiana de Geografía*, 24(2), 113-131.

https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/59564/CONICET_Digital_Nro.36ddc4f0-3dc1-4ec6-8439-29a1c72ca525_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Morss, R.E., Wilhelmi, O.V., Meehl, G.A., y Dilling, L. (2011). Improving societal outcomes of extreme weather in a changing climate: An integrated perspective. *Annual Review of Environment Resources*, 36, 1-25. doi: 10.1146/annurev-environ-060809-100145.

Oficina Asesora para la Gestión del Riesgo de Desastres Cauca - OAGRD (2019). *Estrategia departamental para la respuesta a emergencias Departamento del Cauca*. http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/28885/EDRE_%20Cauca_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas PMA-GCA. (2007). *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas*, 4. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/Geral-96.pdf>

Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2017). *Las amenazas por movimientos en masa de Colombia. Una visión a escala 1:100.000* (1ra ed.). <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/36885?show=full&locale-attribute=en>

Servicio Geológico Colombiano – SGC - y Universidad Nacional de Colombia - UNAL (2013). Memoria explicativa del mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa, escala 1:100.000. Plancha 37 Bolívar. <https://recordcenter.sgc.gov.co/B7/21003010028417/Documento/Pdf/2105284171101000.pdf>