

Metodología aplicada para el cálculo de la degradación geoecológica: caso de estudio Zinacantepec

Methodology Applied for the Calculation of Geoecological Degradation: A Case Study of Zinacantepec

Rocio Endañu Segundo¹, Yered Gybram Canchola Pantoja^{1*}, Clarita Rodríguez Soto¹ y
Néstor Corona Morales²

¹ Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México, Cerro Coatepec
s/n Ciudad Universitaria, Toluca de Lerdo, México, C.P. 50110. renda-
nus175@alumno.uaemex.mx, ygcancholap@uaemex.mx, crodriguez@uaemex.mx,
<https://orcid.org/0009-0006-7920-4613>, <https://orcid.org/0000-0002-8153-1203>,
<https://orcid.org/0000-0002-5684-1197>

²Centro de Estudios en Geografía Humana-El Colegio de Michoacán Zamora, Michoacán,
México, C.P. 59699, corona@colmich.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0001-5511-2518>

*Autor(a) de Correspondencia

Recibido: 28/10/2025. Aceptado: 16/12/2025. Publicado: 05/02/2026.

Cómo citar este artículo: Endañu Segundo, R., Canchola Pantoja, Y. G., Rodríguez Soto, C. y
Corona Morales, N. (2026). Metodología aplicada para el cálculo de la degradación
geoecológica: caso de estudio Zinacantepec. *Geografía Aplicada*, 2(1), 136-173.

Resumen

Zinacantepec posee una diversidad biológica, derivado de que el 60.22% del territorio forma parte de un Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca y de sus características geográficas, sin embargo, el crecimiento y desarrollo de actividades económicas en áreas no aptas ha alterado la configuración del territorio, generando entornos afectados con problemáticas ambientales. Por ello la importancia de realizar estudios de evaluación ambiental desde una perspectiva geoecológica enfocándose en el impacto de las actividades antropogénicas sobre los sistemas naturales, para conocer la alteración en la estructura, funcionamiento y dinámica del paisaje.

Siguiendo este enfoque, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la degradación ambiental mediante el grado de antropización que tiene el paisaje para la identificación de zonas prioritarias de atención y conservación a recursos naturales. La metodología se compone de cuatro fases, que tuvieron como propósito generar una caracterización de la estructura vertical y unidades de paisaje para conocer los elementos de interacción, calculándose el nivel de degradación ambiental a través del porcentaje de antropización sobre el medio natural y una propuesta de tablero basado en indicadores de Presión Estado y Respuesta (PER) para monitoreo de degradación ambiental. Estos resultados proporcionan información clave para la planificación y gestión sostenible del territorio. Se identificaron 18 unidades de paisaje, de las cuales, ocho presentan una degradación baja, con principios de degradación media que cubren el 58.35% del territorio, manifestando una creciente presión antrópica. Mientras que el 14.75% de superficie manifiesta condiciones avanzadas de deterioro. Los resultados muestran una relación directa entre la morfología del relieve y el uso que se le da al territorio; y a mayores elementos antrópicos sobre elementos naturales, será mayor el nivel degradación.

Palabras clave: Actividades antropogénicas, degradación ambiental, geoecología, paisaje, problemáticas ambientales.

Abstract

Zinacantepec has high biological diversity, as 60.22% of its territory is part of the Nevado de Toluca Flora and Fauna Protection Area and due to its geographic characteristics; however, the growth and development of economic activities in unsuitable areas has altered the configuration of the territory, generating environments affected by environmental problems. Therefore, it is important to carry out environmental assessment studies from a geoecological perspective focusing on the impact of anthropogenic activities on natural systems, in order to know the alteration in the structure, functioning and dynamics of the landscape.

Following this approach, the objective of this research was to evaluate environmental degradation through the degree of anthropization of the landscape in order to identify priority areas for attention and conservation of natural resources. The methodology consists of four phases, which had the purpose of generating a characterization of the vertical structure and landscape units to know the elements of interaction, calculating the level of environmental degradation through the percentage of anthropization on the natural environment and a proposed dashboard based on indicators of Pressure State and Response (PER) for monitoring environmental degradation. These results provide key information for planning and sustainable management of the territory. Eighteen landscape units were identified, of which eight show low degradation, with moderate degradation covering 58.35% of the territory, showing increasing anthropic pressure. While 14.75% of the surface area shows advanced conditions of deterioration. The results show a direct relationship between the morphology of the relief and the use given to the territory, and the greater the anthropic elements over natural elements, the higher the level of degradation.

Keywords: Anthropogenic activities, environmental degradation, geoecology, landscape, environmental problems.

1. Introducción

La degradación ambiental impulsada por las acciones humanas representa uno de los mayores desafíos para el desarrollo sostenible a nivel global y local. El sexto informe sobre Perspectivas del Medio Ambiente Mundial (GEO-6) resalta que un entorno saludable es la base para el crecimiento económico, la salud y el bienestar humano (United Nations Environment, 2019). Factores como el cambio climático, la disminución de la biodiversidad y el uso intensivo de los recursos naturales han agravado los procesos de degradación de los ecosistemas, dando lugar a efectos generando impactos que pueden llegar a ser irreversibles.

En México, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) adoptados en 2015 subrayan la necesidad de abordar las problemáticas ambientales como un tema de relevancia mundial (Semarnat, 2016a). Municipios como Zinacantepec enfrentan retos particulares debido a su riqueza en servicios ecosistémicos y diversidad biológica, cuyo crecimiento poblacional y expansión de actividades económicas han modificado el uso del suelo, provocando procesos de degradación ambiental. Entre 1990 y 2016, los bosques de pino del área de estudio redujeron su cobertura pasando de 7820.64 hectáreas (25.24%) a 7533 (24.32%), mientras que las ganancias se concentraron principalmente en el crecimiento de asentamientos humanos. En 1990 la superficie de ocupación era de 856.08 ha (2.76%) y en 2016 incrementó a 2683.44 ha, que representa el 8.66% del territorio (Castillo, 2018). Aunque las campañas de reforestación han desempeñado un papel clave, la fragmentación de los bosques, sigue siendo un desafío. Problemas como la presencia del descortezador y muérdago continúan afectando estas áreas, provocando la destrucción y fragmentación de hábitats de especies silvestres (Semarnat, 2016a). De esta forma la evaluación ambiental cobra relevancia fundamental para comprender la dinámica actual del territorio y tomar medidas que promuevan un desarrollo sostenible.

Desde un enfoque basado en la geoecología del paisaje, se busca integrar características naturales y sociales para diagnosticar la interacción entre los elementos del territorio y diseñar estrategias de conservación (Martínez y Bollo, 2023). En este marco, el desarrollo de indicadores y herramientas de monitoreo resulta esencial para apoyar la toma de decisiones y garantizar la sostenibilidad de los ecosistemas a largo plazo.

A nivel mundial, se han desarrollado diversos enfoques para llevar a cabo estudios ambientales, estrechamente vinculados con la ecología del paisaje y la geoecología. Bastián (2001) hace referencia que en la ecología del paisaje existen dos perspectivas principales. La primera con un enfoque de carácter biológico, predominante en Norteamérica y en algunas escuelas europeas desarrollado por autores como Forman y Godron (1986), Naveh y Lieberman (1984), y Naveh (2000, 2001). La segunda con enfoque geográfico, originado en Europa Central y del Este, con aportes de Neef (1967, 1984), Hasse (1990, 2002), Richling (1983, 1994), Preobrazhenskiy (1983), Zonneveld (1989), y Rougiere y Beroutchachvili (1991), entre otros; este último ha sido adoptado en Latinoamérica (Mateo, 1984 y Salinas, 2001, como se citó en Bollo y Méndez (2018).

Continúan surgiendo nuevos paradigmas en la geografía, entre ellos la geoecología que tiene como antecedente la geografía del paisaje (Martínez y Bollo, 2023). Karl Troll plantea la necesidad de una ciencia dedicada al estudio de los complejos naturales, concebidos como paisajes resultantes de la interacción entre los organismos vivos y el medio que los rodea. En un principio, en 1939 denominó esta disciplina "ecología del paisaje", pero en 1966 la renombró como "geoecología" (Mateo et al., 2012). Y desde la década de 1960, la geoecología se consolidó como la ciencia del paisaje encargada de estudiar los complejos territoriales, tanto naturales como aquellos influenciados por la actividad humana (Golubev, 2006), teniendo como principal objetivo el promover un desarrollo sostenible y armónico entre las actividades humanas y el medio ambiente (Mateo et al., 2012). Desde un enfoque geoecológico, la degradación del paisaje se define como la pérdida de atributos y propiedades del sistema que sustentan su autorregulación, productividad y funciones

socioeconómicas. Este deterioro resulta del desarrollo o intensificación de procesos geoecológicos negativos. Mateo y Ortiz (2001) proponen un enfoque teórico-metodológico que evalúa la degradación considerando el potencial de los recursos, los procesos de equilibrio interno y recuperación, la eficiencia productiva, la capacidad de recuperación y el grado de transformación del paisaje (Mateo y Ortiz, 2001).

La degradación de los paisajes es un componente fundamental de la degradación geoecológica. Siendo el paisaje el objeto de estudio del análisis de la degradación; su estudio permite analizar la magnitud y las tendencias de las crisis ambientales. Este se entiende como un sistema altamente complejo, integrado por una variedad de subsistemas. Para comprender su fundamento geoecológico resulta indispensable considerar tanto el paisaje natural y componentes antropo-naturales, sociales y culturales, cuya interacción es inherente al sistema (Mateo, 2002). El potencial de un paisaje depende de las interrelaciones entre sus componentes y de su capacidad para mantener un equilibrio dinámico; sin embargo, este potencial puede verse superado cuando los recursos se utilizan de manera irracional, generando desequilibrios que deterioran sus componentes y disminuyen su capacidad reguladora. Cuando un paisaje es sobreexplotado o mal gestionado, se desencadena un proceso de degradación ambiental que compromete su productividad, biodiversidad y provisión de servicios ecosistémicos (Delgado et al., 2011).

A escala nacional, la primera discusión en México sobre el deterioro ambiental fue impulsada por el entonces Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables actualmente denominado Instituto Nacional de Ecología (INE), elaborando en 1995 un conjunto de indicadores ambientales sustentados en los lineamientos metodológicos de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). Dichos indicadores se desarrollaron bajo el enfoque Presión-Estado-Respuesta, con el propósito de evaluar las condiciones ambientales (Quiroga, 2007).

Siendo la propuesta de Mateo y Ortiz (2001) ampliamente utilizada y adaptada en estudios ambientales en México, sirviendo como base para evaluar la degradación del paisaje desde

un enfoque geoecológico. Canchola (2017) aplica esta perspectiva integrando variables naturales y antrópicas para determinar el nivel de degradación y etapa de transformación del paisaje (Canchola, 2017). Por su parte, Bollo y Velasco (2018) utilizan indicadores de antropización, degradación del suelo y factores socioeconómicos para calcular el Estado del Medio Ambiente (EMA), aplicando el Método Analítico Jerárquico (AHP) y análisis espacial, lo que permite generar un índice sintético de evaluación ambiental (Mateo, 2011 como se citó en Bollo y Méndez, 2018).

Morales et al. (2019) evaluaron la transformación antropogénica de la cobertura vegetal en Chiapas mediante el Índice de Antropización de la Cobertura Vegetal (IACV), identificando grados de alteración en unidades de paisaje (Priego Santander et al., 2004; Mathews, 2011; Aguirre et al., 2017; Cruz Paz et al., 2018; Bollo Manent y Velasco Méndez, 2018 como se citó en Morales et al., 2019, p. 142). Por su parte, Giraldo (2022) desarrolló el Índice Espacial de Degradación Ambiental Normalizado (IEDAN), integrando 12 variables ecosistémicas y culturales bajo un enfoque sistémico y análisis de sistemas sociales y ecológicos, basado en la Teoría General de Sistemas (TGS) y el análisis de sistemas sociales y ecológicos (SES), permitiendo una visión holística del problema (Giraldo, 2022).

Desde la adopción de la Agenda 2030, la comunidad internacional ha impulsado establecer y adoptar un modelo de desarrollo que posibilite un crecimiento económico sostenible. Este propósito se materializa mediante los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), articulados en tres dimensiones económica, social y ambiental; conformados por 17 objetivos y 169 metas. México ha tenido una participación en su implementación participando activamente incluyéndolos en los planes de desarrollo urbano municipal y diversos proyectos de planeación. (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], 2024).

Sin embargo, la tendencia actual de la degradación ambiental hace necesario establecer un monitoreo de los recursos naturales, con el fin de identificar las áreas que presentan diferentes niveles de deterioro, siendo el análisis geoespacial la mejor opción para conocer los cambios e impactos en el tiempo y el espacio, al igual que desarrollar estrategias y

acciones para mitigar y revertir el deterioro ambiental. Por lo que, esta investigación tiene como objetivo principal la realización de un estudio de degradación ambiental en Zinacantepec, a través del grado de antropización que tiene el paisaje, identificando zonas prioritarias de atención a recursos naturales, integrando un tablero de indicadores para su monitoreo. Donde, se tiene como base el método geográfico para un análisis espacial integrado y el uso de herramientas geotecnológicas que facilite el monitoreo ambiental y que permita a los tomadores de decisiones actuar en favor de la conservación del entorno.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

El área de estudio es el Municipio de Zinacantepec, ubicado en la porción central del Estado de México. El municipio posee un alto potencial de crecimiento económico debido a sus características físico-geográficas. Las condiciones climáticas van de subhúmedas a frías, con suelos diversos como vertisoles, feozem y andosoles, esta última variedad ha permitido el desarrollo de zonas agrícolas y bosques de coníferas, convirtiendo a Zinacantepec en un área clave por su biodiversidad y servicios ecosistémicos. No obstante, enfrenta desafíos ambientales como la alteración del uso del suelo y la deforestación, causada por la explotación forestal no autorizada, incendios, pastoreo extensivo, expansión agrícola y crecimiento poblacional.

Zinacantepec se ubica en la región central del Estado de México, comparte límites municipales con Toluca al norte y este; con Tenango del Valle, Coatepec Harinas, Temascaltepec al sur y con Amanalco, al oeste con Almoloya de Juárez (Figura 1).

Las coordenadas geográficas que delimitan el municipio son: Latitud norte (máxima: 19° 20' 10.40'' y mínima: 19° 04' 15.44''), longitud oeste (máxima: 99° 54' 10.60'' y mínima: 99° 41' 45.36''). Tiene una extensión de 310.15 km², lo que equivale al 1.38% del territorio estatal (INEGI, 2024). Su altitud varía entre 2680-4300 metros sobre el nivel del mar (msnm).

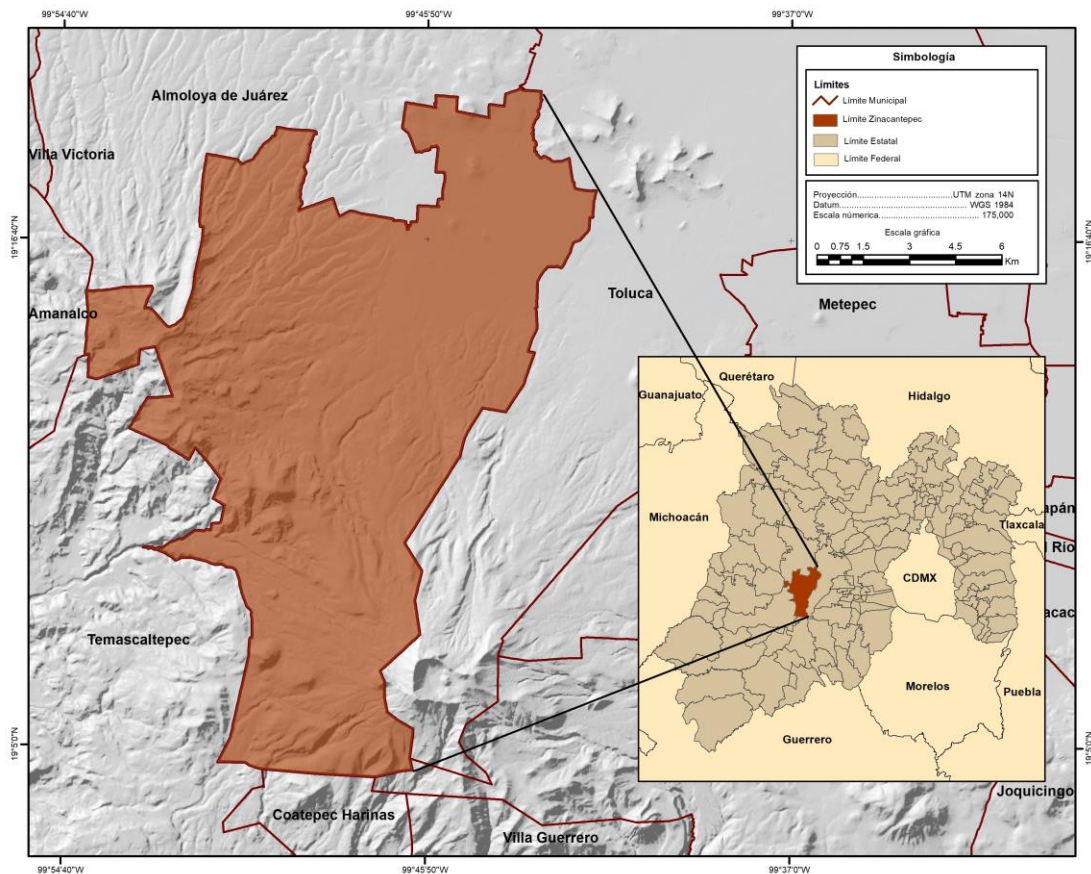


Figura 1. Mapa de localización geográfica de Zinacantepec.

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo, con el Censo de Población y Vivienda 2020, la población asciende a 203,872 habitantes, conformada por un 48.8% de hombres y un 51.2% de mujeres, reflejando un crecimiento del 21.5% respecto al censo de 2010 (INEGI, 2020).

2.1. Materiales y métodos

Para evaluar el estado de degradación ambiental se establecieron 4 fases, cada una permite la generación de insumos básicos para continuar con la siguiente etapa y poder obtener el mapa de degradación ambiental de Zinacantepec (Figura 2).

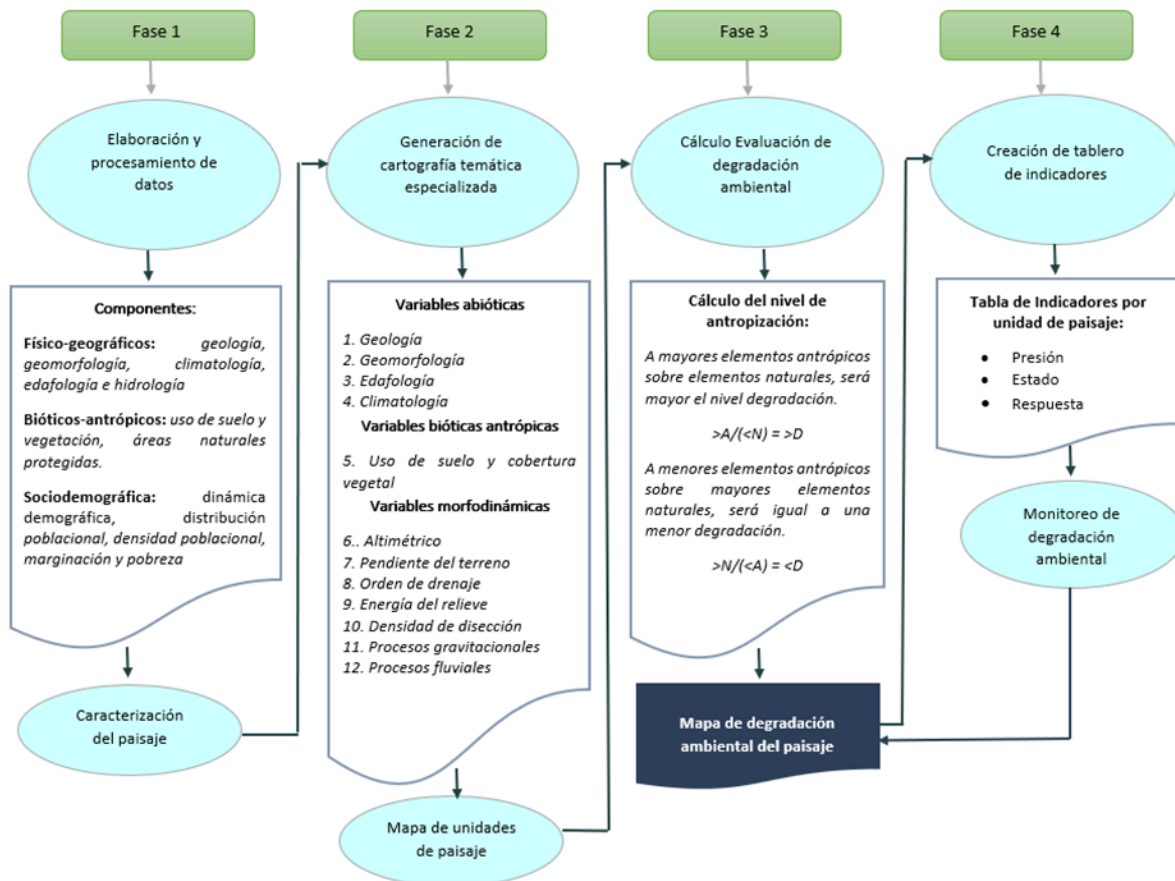


Figura 2. Esquema metodológico.

Fuente: elaboración propia.

Fase 1: Elaboración y procesamiento de datos

Se recopiló información en formatos vectorial, ráster, estadística y bibliográfica, la cual sirvió como base para la elaboración de mapas temáticos, empleando fuentes como INEGI (2024), CONANP (2022) y CONABIO (2024) que sirvieron como base para realizar el mapa de unidades de paisaje. Asimismo, para un análisis espacial del territorio fue importante analizar la estructura vertical del paisaje para describir componentes físico-geográficos, bióticos-antrópicos (Canchola, 2017) y sociodemográficos con el propósito de determinar qué elementos conforman el paisaje.

Fase 2: Generación de cartografía temática especializada

- Integración de variables

Para identificar las unidades del paisaje en la zona de estudio, se tomó como referencia la propuesta de Canchola (2017) retomando 12 variables para identificar áreas homogéneas y generar el mapa base de unidades de paisaje para el análisis de degradación ambiental, integrándose cuatro variables abióticas, una biótica-antrópica y siete morfodinámicas (Tabla 1).

Tabla 1. Variables de cartografía temática.

Variables	Fuente	Características
Variables Abióticas		
1. Geología	Datos del IFOMEGEM, cartografiada por K. Bloomfield durante 1973 y publicados por Sánchez-Rubio (1978).	Representa el tipo de unidades geológicas, para comprender la composición del relieve. Estas son de tipo volcánico conformadas por derrames de lava andesítica, basáltica y depósitos volcanoclásticos, escala 1:50,000.
2. Geomorfología	Elaboración propia en base al manual del Sistema ITC para levantamientos geomorfológicos (Verstappen y Van Zuidam, 1991).	Identifica las formas del terreno y procesos de formación y evolución para comprender la dinámica y evolución del paisaje. Se encuentran asociadas a las estructuras del volcán Nevado de Toluca y el San Antonio abarcando desde domos, conos hasta valles y planicies.
3. Edafología	Datos de cartas edafológicas del CETENAL (1976).	Muestra los tipos, composición y características del suelo. Identificándose siete clases en el área de estudio predominando el desarrollo de andosoles y feozem.
4. Climatología	Tipos de climas del geo portal CONABIO (Casa A. y CONABIO (1997) y la información meteorológica del software ERIC (2008).	Muestra los patrones climáticos y meteorológicos que impactan en la formación del paisaje. Predominando en el área, climas de tipo semifrío subhúmedo y templado subhúmedo.
Variables Bióticas- Antrópicas		
5. Uso de suelo y vegetación	Se utilizó una imagen Sentinel 2a (Copernicus Open Access Hub, 2022).	Se identifica el uso que se le da al territorio y la distribución de la cubierta vegetal. Compuesta principalmente por bosque de pino al sur de Zinacantepec y al norte asentamientos humanos y zonas agrícolas

Variables Morfodinámicas		
6. Altimetría	Se realizó utilizando como base al Modelo Digital de Elevación (INEGI, 2013; 2020a y ASF, 2010).	Representación gráfica de las variaciones de altitud. Estas van de 2680-4300 msnm, constituyendo un total de 18 pisos altitudinales que representan zonas de planicie al noroeste, piedemonte hacia el sureste y suroeste, conforme más se acerca al sur, las zonas son de montaña constituidas por ladera de tipo cóncava y convexa.
7. Pendiente del terreno	Se utilizó como base al Modelo Digital de Elevación (DEM) y las clasificaciones establecidas en base a Van Zuidam (1985).	Identifica los distintos grados de inclinación del relieve. La clasificación muestra seis rangos de pendiente que van de 0-2° en zonas planas en el norte y hacia al sur valores >35 que son zonas muy escarpadas.
8. Orden de drenaje	Elaboración propia en base a la clasificación propuesta por Strahler, 1989 (Vázquez Reyes, 1989).	Muestra la organización jerárquica de la red fluvial en una cuenca hidrográfica. Identificándose cuatro tipos de órdenes, siendo el de 1er orden el más erosivo, los cuales tienen una distribución sobre laderas y piedemontes del nevado en subcuencas del río Tejalpa y Verdiguél.
9. Energía del relieve	Elaboración propia en base a datos de INEGI	El mapa representa la acción conjunta entre procesos endógenos y exógenos. Integrando los valores más altos hacia el centro y sur del municipio, mientras que los más bajos se ubican en el norte y noreste.
10. Densidad de disección		Permite evaluar las condiciones de saturación hídrica y la densidad de la red fluvial. En las zonas montañosas, en las laderas del nevado, se observan altos valores, directamente relacionados con las pendientes pronunciadas que favorecen el escurrimiento superficial y aceleran los procesos erosivos.
11. Procesos gravitacionales		Muestra la distribución y características de los fenómenos y movimientos del terreno inducidos por la gravedad. Las áreas a remoción en masa son aquellas con pendientes mayores a 35°, como lo son el Cerro Gordo, parte de la estructura del domo volcánico del Nevado, así como áreas específicas a laderas del Cerro la Calera y el volcán San Antonio.
12. Procesos Fluviales		Representa la interacción entre los sistemas fluviales y el entorno. Está dividido en 3 categorías, las cuales tienen relación directa con los órdenes de drenaje.

Fuente: elaboración propia.

- Creación de mapa de Unidades de Paisaje

El siguiente paso, fue la elaboración del mapa de la estructura horizontal del paisaje. Este mapa representa la distribución espacial de las distintas unidades del paisaje, evidenciando su organización dentro del territorio. Su clasificación se fundamenta en la diferenciación

paisajística a partir de su estructura vertical y morfodinámica, incorporando criterios y variables específicas en los geocomponentes, respaldados por cartografía temática especializada. Para ello, se realizó un proceso de fotoidentificación, que permitió agrupar las formas de relieve según los procesos endógenos y exógenos que las modelan, así como su interacción. Este análisis se complementó con el uso del Modelo Digital de Elevación (MDE), proporcionando una visión más detallada del territorio. La diferenciación de las unidades de paisaje se basa en el axioma paisajístico propuesto por Canchola (2017).

$$UP = (VAb+VBAn+VM)$$

Donde:

UP = Unidad de Paisaje

VAb = Variables Abióticas (geología, geomorfología, edafología y climatología)

VBAn = Variables Bióticas y Antrópicas (uso de suelo y vegetación)

VM = Variables Morfodinámicas (altimetría, pendiente del terreno, orden de drenaje, energía del relieve, densidad de disección, procesos gravitacionales y procesos fluviales)

Todas las variables fueron procesadas en el software QGIS a escala 1:50 000. A través de la superposición de mapas y la identificación de patrones espaciales homogéneos se generó un mapa compuesto por 18 Unidades de Paisaje (UP). Cada una de estas unidades se define por una combinación única de atributos geomorfológicos, geológicos, climáticos, edáficos, de uso del suelo y de vegetación. También, conformadas por variables morfométricas y morfológicas como la altimetría, energía del relieve, densidad de disección, pendiente, orden de drenaje, además procesos fluviales y gravitacionales, fundamentales para comprender la génesis, evolución como distribución del relieve.

El sustento teórico de la investigación se basa en estudios sobre geomorfología, morfometría y paisaje, desarrollados por Strahler (1952), Lugo (1980), Ortiz y Bocco (1989), Espinoza y Arroyo (2011) y Canchola (2017). En un entorno donde convergen diversas

funciones sistémicas es fundamental considerar las condiciones visibles de naturalidad, las funciones socioeconómicas del entorno orientadas a satisfacer las necesidades humanas, los procesos ambientales adversos y los mecanismos de autorregulación y mitigación, tanto naturales como inducidos por el ser humano (Mateo y Ortiz, 2001).

Fase 3: Cálculo de Evaluación de Degradación Ambiental

- Evaluación de degradación ambiental

Se utilizó de base la metodología que propone Mateo y Ortiz (2001) donde categoriza la degradación del paisaje en cuatro niveles, en conjunto con la propuesta de Canchola (2017) quien hace una nueva tipificación agregando el factor de espacialidad, representatividad y criterio antropogénico para asignar los valores de ponderación, además se añadió una nueva contribución a dichas metodologías, el nivel de antropización, estableciendo el siguiente postulado:

$>A/(<N) = >D$ (A mayores elementos antrópicos sobre elementos naturales, será mayor el nivel degradación).

$>N/(<A) = <D$ (A menores elementos antrópicos sobre mayores elementos naturales, será igual a una menor degradación).

Donde:

A = Elementos antrópicos

N = Elementos naturales

D = Nivel de degradación

Se estableció que el valor 1 representa el nivel más bajo, correspondiente a características o variables naturales con una presencia difusa, intermitente y dispersa en el territorio. En este nivel, las variables antropogénicas son prácticamente inexistentes o tienen un impacto mínimo, abarcando entre 0% y 25% del área. El nivel 2 se asigna a características con una

mayor representatividad espacial, donde las actividades antrópicas generan un impacto constante, afectando entre 26% y 50% del territorio.

En el nivel 3, se identifican condiciones altamente dinámicas y persistentes, con una influencia antropogénica significativa, cubriendo entre 51% y 75% del territorio. Finalmente, el nivel 4 hace referencia a variables naturales que generan procesos extremadamente intensos y dinámicos. En esta categoría, las actividades humanas abarcan entre 76% y 100% del área, lo que implica un alto grado de antropización y en consecuencia, un mayor impacto sobre las unidades de paisaje, en comparación con zonas de menor intervención humana. La asignación de pesos se llevó a cabo con base en una investigación científica colegiada y un análisis detallado del territorio, utilizando la superposición de mapas y la correlación de variables para garantizar una evaluación precisa utilizando el trabajo de campo como validación de la información.

- Validación de información

El trabajo en campo complementó la investigación realizada en gabinete con el propósito de corroborar la información obtenida previamente. Durante esta etapa se verificó la estructura vertical de las unidades de paisaje y las unidades de paisaje. Además de la recopilación de información sobre los procesos asociados a la degradación del paisaje, lo cual permitió seleccionar los indicadores ambientales que conformarían el tablero de indicadores y establecer los criterios para asignar los valores de ponderación utilizados en la evaluación de la degradación ambiental, tomándose como referencia la *Antología comentada de un Manual para trabajo de campo de geografía ambiental* (Canchola, 2021). Para la asignación de los pesos se sustentó en un proceso de investigación científica colegiada y en un análisis territorial basado en la superposición cartográfica y la correlación de variables procesando la información en el Software QGIS a escala 1:50000.

Fase 4: Creación de tablero de indicadores

- Monitoreo de Evaluación de Degradación Ambiental

Según, la OECD (1998), los indicadores ambientales desempeñan dos funciones fundamentales: simplificar la presentación de datos ambientales y facilitar la comunicación de información sobre el entorno. Esta doble función los convierte en herramientas clave para transmitir información de manera clara, precisa y respaldada científicamente (Semarnat, 2005).

Para llevar a cabo un seguimiento eficaz del estado ambiental se diseñó un tablero de monitoreo, fundamentado en los indicadores de Presión, Estado y Respuesta (SEMARNAT, 2005) y en el Atlas Internacional de Indicadores de Sustentabilidad (1995). La selección de indicadores se estableció como una herramienta fundamental para el seguimiento y monitoreo de la degradación ambiental, facilitando la toma de decisiones por parte de las autoridades municipales (Winograd et al., 1995).

3. Resultados

3.1 Mapa de Unidades de Paisaje

Se identificaron y delimitaron 18 unidades del paisaje, que reflejan la diversidad ambiental de la región, las condiciones naturales y el grado de transformación antrópica. Esta clasificación permitió distinguir áreas montañosas con vegetación conservada, valles con vegetación arbórea, secundaria arbustiva y zonas agrícolas; así como planicies aluviales sujetas a procesos de uso intensivo. En la tabla 2 se muestran las principales características de cada unidad de paisaje.

La unidad más extensa es la UP-15 (15.34%) destaca por su complejidad geomorfológica y gran diversidad de coberturas. El relieve es predominantemente volcánico, con domos, laderas, piedemontes y planicies y las pendientes varían de 2° a 58°, con las más escarpadas

en zonas de montaña (UP-5 y UP-8) y las zonas planas (UP-2 y UP-18) concentran el desarrollo urbano y agrícola más intensivo.

Tabla 2. Características de las Unidades de paisaje.

Unidad de Paisaje	Características principales
UP-1	Localizada al norte; la estructura es un domo volcánico (Cerro del Molcayete) con piedemontes. Relieve moderado accidentado, suelos fértiles (vertisoles y feozem), uso mixto (agricultura y asentamientos) presenta procesos dominantes de depósito.
UP-2	Planicie aluvial central con fuerte intervención antrópica. Se ubica la cabecera municipal y hay presencia de zonas agrícolas; el relieve es plano, los suelos son de tipo feozem y vertisol con procesos de acumulación aluvial.
UP-3	Piedemontes, domos volcánicos y laderas entre 2800–3200 msnm. Zonas principalmente agrícolas con remanentes de bosque; procesos de depósito, transporte y erosión activa.
UP-4	Laderas volcánicas con altitudes de 2900–3400 msnm, suelos feozem y andosol. De uso agrícola dominante con fragmentos de bosque en zonas altas.
UP-5	Incluye parte de la zona del cráter del Nevado de Toluca. Relieve montañoso (hasta 4400 msnm), con suelos de tipo andosol húmico y presencia de bosque de pino y praderas alpinas; presenta procesos de depósito con erosión intensa en pendientes.
UP-6	Laderas de andesita-dacita y valles fluviales. Densa cobertura forestal, desarrollando suelos de tipo andosoles; en áreas de pendientes pronunciadas existen procesos fluviales erosivos.
UP-7	Zona de ladera con bosques de pino y oyamel con vegetación secundaria. Pendientes moderadas a altas, procesos de depósito y erosión fluvial; importante conector ecológico.
UP-8	Laderas volcánicas con un domo volcánico (Cerro Gordo), pendientes escarpadas (hasta 58°). Cobertura de bosque con presión antrópica; procesos de acumulación y erosión localizada.
UP-9	Zona de transición ecológica en el suroeste, con pendiente suave. Uso mixto (bosque, agricultura, vegetación secundaria); procesos combinados de depósito y erosión.
UP-10	Laderas y valles fluviales con presencia de bosques de pino-oyamel y agricultura de temporal; procesos de depósito y erosión fluvial.
UP-11	Piedemontes y valles fluviales verticales; altitud media (2700–3200 msnm). Suelos fértiles, con potencial agrícola; procesos de depósito con erosión dinámica localizada.
UP-12	Laderas con domos volcánicos, uso mixto con predominio agrícola. Cobertura forestal y asentamientos humanos, presenta procesos de depósito y erosión fluvial.
UP-13	Domo volcánico “La Calera” constituido por bosques de oyamel y vegetación secundaria; los procesos dominantes son den transporte con erosión localizada.
UP-14	Piedemontes y domo volcánico; pendientes suaves. Uso agrícola y asentamientos (La Puerta del Monte), se desarrollan procesos de depósito con erosión fluvial moderada.
UP-15	Es la unidad más extensa siendo un complejo volcánico con nueve domos. El uso es diversificado (bosque, agricultura) y los procesos son de tipo transporte, depósito y erosión activa.
UP-16	Piedemontes de toba riolítica, uso agrícola intensivo. Pendientes moderadas y suelos fértiles, los procesos son de depósito y transporte, con erosión significativa.
UP-17	Materiales volcánicos y aluviales con uso agrícola predominante. Pendientes suaves a moderadas, se presentan procesos de depósito con fuerte erosión dinámica.
UP-18	Planicie aluvial con pendientes muy suaves. Alta concentración de asentamientos y agricultura es una unidad de depósito con procesos erosivos y estructurales transitorios.

Fuente: elaboración propia.

Las áreas más antropizadas son la UP-2 y UP-18, por su carácter urbano y agrícola intensivo y las zonas clave para conectividad ecológica y regulación hídrica son la UP-7 y UP-6, por su cobertura boscosa y procesos dinámicos. Las Áreas agrícolas predominantes son UP-2, UP-3, UP-12 y UP-16, con suelos fértiles desarrollando agricultura de temporal y anual.

Hay tres tipos principales de procesos: depósito (acumulación de materiales): predomina en 14 de las 18 unidades. Transporte y remoción en masa: activo en zonas de ladera con pendientes medias y altas (UP-3, UP-6, UP-13). Mientras que la erosión fluvial se encuentra presente en casi todas las unidades, aunque más intensa en zonas medias y bajas (UP-10, UP-14, UP-17, UP-18).

De forma general el municipio presenta una gran diversidad paisajística resultado de su origen volcánico, gradientes altitudinales, y el uso por intervención humana. Por lo que las unidades de paisaje reflejan una transición altitudinal y funcional de 3 tipos: 1) Zonas altas, que conservan bosques y funciones ecológicas; 2) Zonas medias, que son de transición y uso agroforestal; y 3) Zonas bajas, que concentran agricultura intensiva y asentamientos. Sin embargo, los procesos geomorfológicos actuales siguen modelando el territorio, con importante influencia hacia el aprovechamiento de los recursos. La figura 3 muestra la distribución espacial de cada unidad de paisaje.

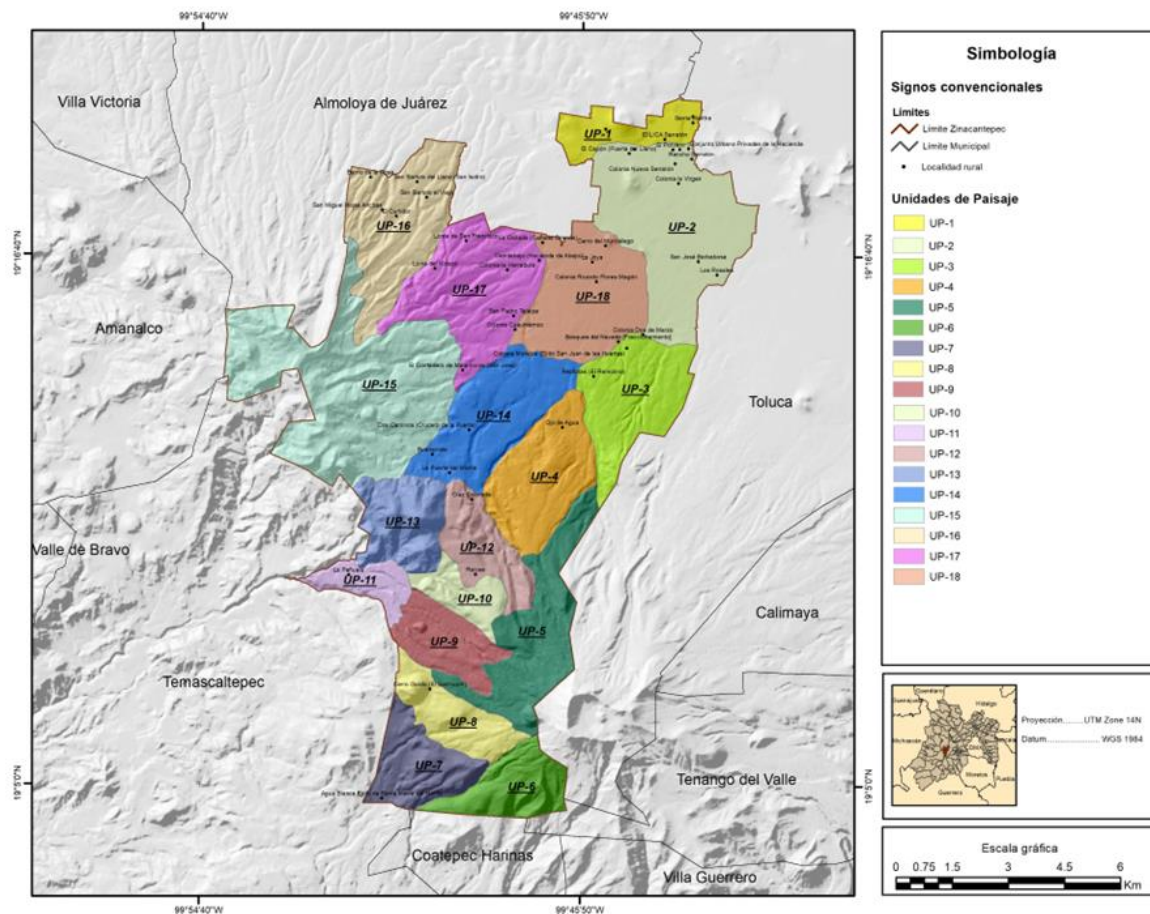


Figura 3. Mapa Unidades de Paisaje.

Fuente: elaboración propia.

3.2 Evaluación de Degradación Ambiental del Paisaje de Zinacantepec

El enfoque de la degradación geoecológica integra los principios de la geografía y la ecología, resaltando la necesidad de un análisis a gran escala para comprender los procesos de degradación ambiental. Dado su alcance y alineación con los objetivos del estudio, se adoptó este enfoque, enfatizando su relevancia en la comprensión y evaluación integral de la degradación geoecológica de la zona de estudio.

Zinacantepec presenta distintos niveles de degradación que van de baja a media de acuerdo con la clasificación que establece Mateo y Ortiz (2001). Sin embargo, basándose en la

subclasificación que hace Canchola (2017), se han hecho adaptaciones considerando los resultados obtenidos, con el fin de mejorar la precisión y análisis para una evaluación más detallada (Figura 4).

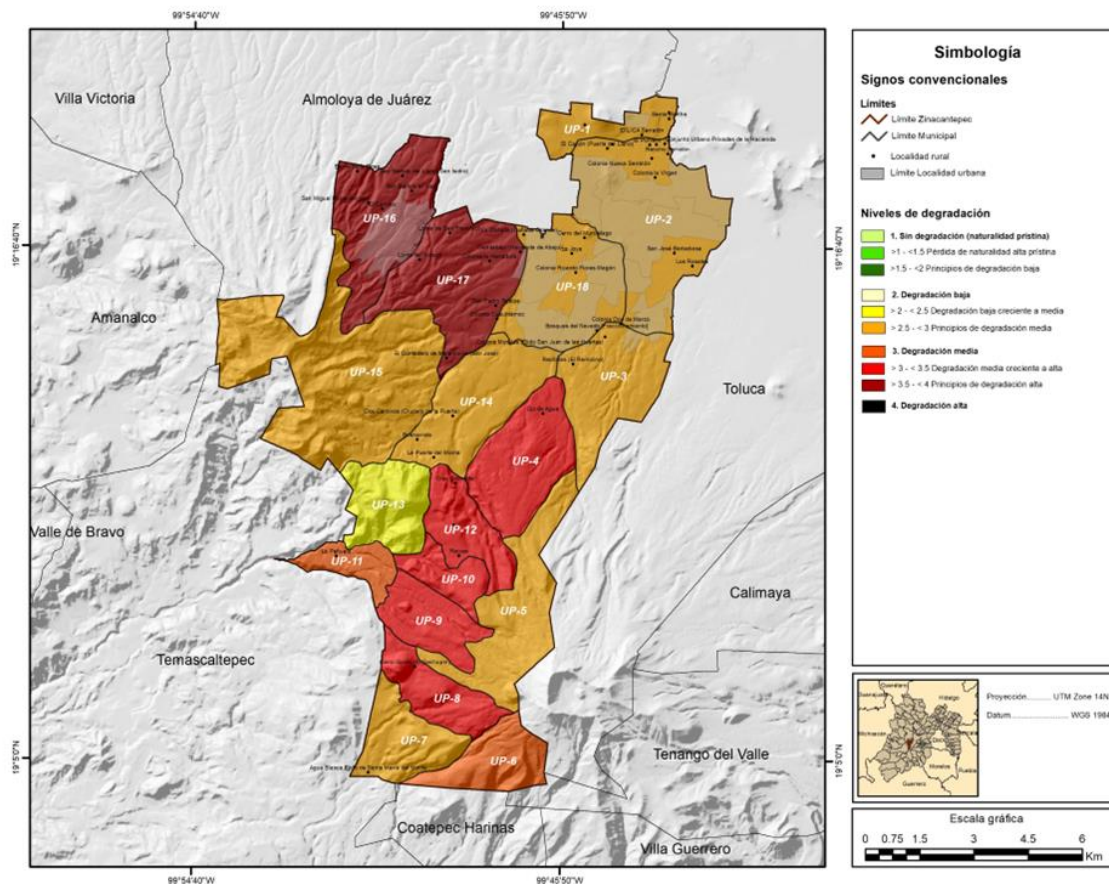


Figura 4. Evaluación de Degradación Ambiental.

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 3, se muestra el nivel de degradación que tiene cada unidad de paisaje y la superficie que representa a nivel municipal.

- **Degradación baja**

Hay nueve unidades que presentan degradación baja, de acuerdo con la clasificación de Mateo y Ortiz (2001), distribuidas en dos subcategorías; (1) degradación baja creciente a media y (2) principios de degradación media, distribuidas de norte a sur de forma

homogénea. Ambos subniveles representan el 62.22% del total de Zinacantepec. Estas unidades presentan una pequeña pérdida de los potenciales naturales y de la productividad original, la cual puede mantenerse similar o incrementarse de acuerdo con la presión antrópica. En estas zonas ocurren cambios notables en la estructura vertical, iniciando transformaciones en la estructura horizontal. Se manifiestan algunos procesos geotecnológicos destructivos de intensidad baja a media (Mateo y Ortiz, 2001). A continuación, se identifica cada subnivel y las características principales de la unidad de paisaje que le confieren ese tipo.

Tabla 3. Porcentaje de niveles de degradación geoecológica.

Nivel de degradación	Subnivel de degradación	Unidades de paisaje	Superficie km ²	Porcentaje %
Degradación Baja	a) Degradación baja creciente a media	UP-13	12.00	3.87
	b) Principios de degradación media	UP-1, UP-2, UP-3, UP-5, UP-7, UP-14, UP-15, UP-18	180.98	58.35
Degradación Media	a) Degradación media	UP-6, UP-11	16.12	5.20
	b) Degradación media creciente a alta	UP-4, UP-8, UP-9, UP-10, UP-12	55.30	17.83
	c) Principios de degradación alta	UP-16, UP-17	45.76	14.75

Fuente: elaboración propia.

a) Degradación baja creciente a media

La UP-13, que ocupa el 3.87% del municipio, presenta una cobertura forestal densa y bien conservada, principalmente de bosques de oyamel y pino, acompañados de vegetación secundaria y pastizales inducidos. Esta vegetación contribuye a estabilizar el suelo, reducir la escorrentía y favorecer la infiltración de agua.

Actualmente, la intervención humana es baja, lo que ha permitido mantener un nivel de degradación bajo. Sin embargo, existe una tendencia creciente hacia una degradación media debido a: pendientes pronunciadas (16°–35°) en el 80% del área; alta energía del relieve (300–400 metros), lo que incrementa la susceptibilidad a inestabilidad del terreno y procesos fluviales erosivos presentes en el 25% del área, que podrían intensificarse por

perturbaciones como caminos, incendios o tala. En conjunto, estos elementos configuran un escenario de vulnerabilidad ecológica que exige monitoreo y manejo preventivo para evitar una transición hacia estados más avanzados de degradación.

b) Principios de degradación media

Este subnivel incluye a las unidades: UP-1, UP-2, UP-3, UP-5, UP-7, UP-14, representando el 58.35%. En el caso de la UP-1, UP-2 y UP-18 en sectores localizados como las laderas del Cerro del Molcajete y el Cerro San Lorenzo Cuauhtenco se manifiestan procesos fluviales erosivos y zonas de transporte con pendientes más pronunciadas. A esto se suma la creciente presión antrópica derivada de la urbanización y expansión de asentamientos como Santa Martha, IDÍLICA Serratón, El Capón y otros complejos habitacionales, lo cual incrementa el riesgo de pérdida de cobertura vegetal, compactación del suelo y alteración del drenaje natural. La UP-2 y UP-18 son las que más presión antrópica presentan, pese a que aún hay zonas combinadas con actividades agrícolas intensivas, tanto de riego como de temporal y vegetación arbustiva y herbácea.

Esta fuerte antropización implica una fragmentación de la cobertura vegetal natural, una alteración de los flujos hídricos superficiales y subterráneos, así como un aumento en los procesos de compactación del suelo, pérdida de materia orgánica y erosión laminar. Si bien las pendientes son en su mayoría suaves (entre 2° y 4°), existen sectores como el Cerro de San Antonio Acahualco donde las pendientes aumentan hasta 16°, incrementando el potencial de escurrimiento superficial y, por tanto, la susceptibilidad a la erosión si se pierde la cobertura del suelo.

La UP-3, UP-5 y UP-7 presentan factores geomorfológicos y ciertos procesos activos en el territorio, en primer lugar, estas unidades poseen una proporción significativa de pendientes medias a fuertes, que en algunos sectores alcanzan hasta 58°, como en el domo volcánico del Nevado de Toluca. Este tipo de topografía favorece la escorrentía superficial, la pérdida de suelo, especialmente cuando se ve comprometida la cobertura vegetal.

Además, la energía del relieve en estas áreas es elevada, con desniveles que oscilan entre 100 y 300 metros, lo que contribuye a una mayor dinámica erosiva, particularmente en zonas de ladera o piedemonte. Otro aspecto para considerar es la presencia de procesos fluviales de tipo erosivo-dinámico, activos en una proporción que va del 30 al 50% del área, afectando principalmente laderas expuestas o sectores con menor cobertura boscosa. Estos procesos, aunque aún contenidos, podrían intensificarse si se incrementan las perturbaciones.

Si bien, estas unidades aún conservan una importante cobertura vegetal, existen sectores donde esta vegetación es secundaria o ha sido sustituida por pastizales inducidos o parcelas agrícolas, lo cual reduce la capacidad natural de protección del suelo. Esta situación se ve acentuada por la presión antrópica de asentamientos rurales dispersos.

Para el caso de las UP-14 y UP-15 presentan factores estructurales y antrópicos que explican una tendencia creciente hacia una degradación media. En la UP-15 por ejemplo, el 40% del territorio presenta pendientes de 16° a 35° y la energía del relieve alcanza entre 200 y 300 metros, condiciones que generan una alta susceptibilidad a procesos de transporte y erosión. Esta unidad también presenta una cobertura significativa de zonas de transporte. Por otro lado, tanto en la UP-14 como la UP-15, se detecta una presión antrópica creciente, reflejada en la presencia de asentamientos humanos, actividades agrícolas de temporal y riego y en el caso de la UP-14, explotación minera. Estas actividades generan fragmentación del paisaje, compactación del suelo, pérdida de cobertura vegetal y alteraciones en la red de drenaje natural.

A esto se suma la presencia de procesos fluviales erosivos-dinámicos, activos en el 30% de la UP-14 y en el 50% de la UP-15, lo que representa una presión constante sobre los suelos, particularmente en sectores donde la pendiente, el uso del suelo y la vegetación ya no funcionan como mecanismos de contención natural. En conjunto, ambas unidades aún conservan una base ecológica funcional y características de estabilidad, pero enfrentan una creciente vulnerabilidad derivada de su morfología y del uso intensivo del territorio.

- **Degradación media**

Dentro de este nivel hay 9 unidades de paisaje que se ubican en este rango, caracterizadas por una pérdida significativa de potenciales naturales originales y decremento de productividad. Se presentan fuerte alteración de los mecanismos que garantizan el funcionamiento, la autorregulación y la regeneración de los sistemas, poniendo en riesgo su coherencia estructural, integridad funcional y las bases que garantizan su sostenibilidad vital. Asimismo, se manifiestan diversos procesos geotecnológicos cuya intensidad varía de media a alta.

- a) **Degradación media**

Las UP-6 y UP-11, cubren el 5.20% de superficie municipal. En la Unidad del Paisaje UP-6, la morfología del terreno es el principal factor que impulsa la degradación. Las fuertes pendientes (16° - 35° en más del 50%), combinadas con una alta energía del relieve (de hasta 400 metros) hacen que el suelo esté en constante exposición a procesos de remoción en masa y transporte. Aunque la cobertura boscosa es aún abundante, las condiciones topográficas limitan su capacidad para frenar la erosión. Además, los valles fluviales verticales intensifican la disección del terreno, mientras que los procesos fluviales de tipo erosivo-dinámico, aunque contenidos (20%) reflejan una dinámica activa que podría intensificarse si se reduce la cobertura vegetal.

En contraste, en la UP-11, la tendencia a la degradación se debe a la presión antrópica creciente. Aunque el relieve es más suave y estable, con pendientes de 2° - 8° , la transformación del uso del suelo es significativa. Aproximadamente el 60% del territorio está destinado a actividades agropecuarias y asentamientos humanos, lo cual ha generado fragmentación de la cobertura vegetal y pérdida progresiva de las funciones ecosistémicas del suelo.

b) Degradación media creciente a alta

Con 17.83% las UP-4, UP-9, UP-8, UP-10, UP-12 presentan esta subcategoría, resultado de la combinación de condiciones naturales que favorecen los procesos erosivos y del impacto acumulado de las actividades humanas. Uno de los factores más determinantes es la pendiente del terreno, ya que en todas estas unidades se registran inclinaciones superiores a 8° en al menos el 50% de la superficie y en algunos casos, como la UP-8, se alcanzan pendientes extremas de 35° a 58°, lo que incrementa significativamente el potencial de escurrimiento superficial y erosión hídrica, especialmente en laderas expuestas o con vegetación secundaria.

Asimismo, estas unidades presentan valores medios a altos de energía del relieve entre 100 y 300 metros, condición que refleja un paisaje dinámico y morfológicamente activo, donde los procesos de transporte de materiales, disección y remoción en masa pueden intensificarse ante perturbaciones, como la fragmentación del suelo o pérdida de cobertura vegetal. Otro factor común es la presencia significativa de procesos fluviales de tipo erosivo-dinámico, que afectan entre 30% y 50% del área.

Por otra parte, aunque en varias unidades predomina el suelo andosol húmico, con buena capacidad estructural y alta fertilidad, su estabilidad depende del mantenimiento de la cobertura vegetal, aunque esta es secundaria arbustiva y pastizales inducidos, la cual es indicativa de procesos de sustitución de vegetación primaria. Por otra parte, los asentamientos rurales dispersos y actividades extractivas (como en la UP-4) también contribuye a aumentar la vulnerabilidad del sistema, alterando los patrones de drenaje natural y promoviendo procesos de compactación del suelo. En conjunto, estas unidades comparten una serie de características geomorfológicas y de uso del suelo que las hacen propensas a una degradación creciente si no se aplican medidas de manejo y conservación.

c) Principios de degradación alta

Las UP-16 y UP-17, presentan factores que explican una tendencia hacia una degradación alta, principalmente relacionados con la presión antrópica, la vulnerabilidad geomorfológica y la intensidad de los procesos erosivos actuales. Estas representan una superficie de 14.75% del municipio. Ambas unidades presentan una ocupación del suelo intensiva y en expansión, siendo este uno de los factores más determinantes en la tendencia hacia una degradación alta. En la UP-16, el 60% del territorio está destinado a agricultura de temporal anual; a ello se suma un 30% de cobertura urbana y de asentamientos rurales en localidades como Santa María del Monte, San Miguel Hojas Anchas y San Bartolo del Llano, cuya expansión incrementa la fragmentación del paisaje y altera la dinámica hídrica y edáfica.

Una situación similar se observa en la UP-17, donde además de una amplia superficie dedicada a agricultura de temporal (60%), se identifica un 25% de agricultura de riego, lo cual intensifica la presión sobre los recursos hídricos y el suelo, generando compactación, pérdida de fertilidad y erosión. La presencia de numerosas localidades (San Pedro Tejalpa, Colonia La Herradura, entre otras) refuerza el patrón de antropización progresiva.

Desde el punto de vista físico, ambas unidades muestran valores altos de densidad de disección (2.5–3.5 km/km² en el 70-80% de la superficie) y energía del relieve de hasta 200 metros, condiciones que favorecen una red hidrográfica activa y procesos erosivos continuos, sobre todo en temporadas de lluvia. Aunque los suelos dominantes (andosol húmico y feozem háplico) son fértiles y bien estructurados, su resiliencia se ve comprometida por la reducción de la cobertura forestal, que apenas representa entre el 5% y 10% del territorio en ambas unidades, sustituida en gran medida por vegetación secundaria arbustiva o usos agropecuarios intensivos. Esta pérdida de cobertura boscosa incrementa la susceptibilidad a la erosión.

En conjunto, la alta presión sobre el territorio, la fragmentación del paisaje, la presencia activa de procesos erosivos, y las características geomorfológicas favorecen la inestabilidad y justifican el nivel de degradación hacia una tendencia alta, especialmente si no se implementan medidas urgentes de conservación, restauración forestal y manejo sostenible del suelo.

3.4 Tablero de Indicadores Ambientales

Diversas instituciones y academias han establecido criterios e indicadores para evaluar los recursos naturales y territoriales en diferentes escalas, destacando los aportes de INEGI (2000), CIAT (2001), la OCDE (2002), la CEPAL (2003), Semarnat (2016b) así como instituciones y gobiernos locales, como la Comisión de Estudios del Sector Privado para el Desarrollo Sustentable (CESPEDES), gobiernos de Jalisco y Querétaro, han desarrollado indicadores orientados a describir las condiciones naturales y socioeconómicas del territorio y sus recursos.

Si bien, existen múltiples indicadores aplicables a distintas escalas, los seleccionados en la tabla 4, destacan por su fácil representación cartográfica, el respaldo de metodologías accesibles, la disponibilidad de fuentes a datos confiables y actualizables para un monitoreo continuo. Además, permiten identificar tendencias y resultan adecuados para la caracterización a nivel regional.

Es fundamental fortalecer las capacidades técnicas de los municipios para que puedan implementar sistemas de monitoreo espacial de estos indicadores, los cuales permiten evaluar de manera integral las presiones antrópicas sobre los recursos naturales y diagnosticar el estado funcional de los ecosistemas. Asimismo, facilitan la delimitación de zonas críticas con alta susceptibilidad a procesos de degradación, lo que resulta clave para priorizar intervenciones. En conjunto, estos indicadores constituyen una herramienta estratégica para una planificación territorial ambientalmente informada, orientada a la

conservación de la integridad ecosistémica y a la gestión sostenible del paisaje y los recursos naturales a largo plazo.

Tabla 4. Tablero de Indicadores para seguimiento y monitoreo ambiental.

Descripción	Unidad de Paisaje
Tasa de deforestación	UP-3, UP-4, UP-5, UP-6, UP-7, UP-8, UP-9, UP-10, UP-11, UP-12, UP-13, UP-14, UP-15, UP-16, UP-17, UP-18.
Refleja la presión ejercida sobre los recursos forestales, a medida que los bosques disminuyen, se generan efectos en cadena que impactan el entorno, como alteraciones en el clima local, deterioro de la calidad del suelo y afectación de los recursos hídricos. Por ello, esta tasa se convierte en una herramienta esencial para comprender el impacto de estos cambios (Palacio et al., 2004).	
Relación Cobertura Natural/Cobertura Antrópica	UP-1, UP-2, UP-3, UP-4, UP-7, UP-11, UP-12, UP-14, UP-16, UP-17, UP-18.
Permite evaluar el impacto global de las actividades humanas sobre los recursos naturales, comparando la cobertura natural con la antrópica para identificar áreas en riesgo de mayor degradación, facilitando el monitoreo de cambios en el uso del suelo a lo largo del tiempo, ayudando a detectar tendencias de deterioro o recuperación del territorio.	
Extensión de la Frontera Agrícola	UP-3, UP-4, UP-5, UP-6, UP-7, UP-8, UP-9, UP-10, UP-11, UP-12, UP-13, UP-14, UP-15, UP-16, UP-17, UP-18.
Mide la expansión de la frontera agrícola en un período determinado, evidenciando la presión de las actividades agropecuarias sobre las coberturas naturales, como bosques y matorrales. Ayuda a detectar áreas vulnerables debido a la conversión de tierras naturales en áreas agrícolas, lo que puede ocasionar pérdida de biodiversidad, erosión del suelo y alteraciones en los ciclos hídricos, facilitando el monitoreo de los cambios en el uso del suelo, permitiendo identificar patrones de transformación (Semarnat, 2005).	
Densidad de Población	UP-1, UP-2, UP-3, UP-4, UP-7, UP-11, UP-12, UP-14, UP-16, UP-17, UP-18.
Permite identificar áreas con mayor concentración de personas y, por lo tanto, mayor presión sobre los recursos naturales. Las zonas densamente pobladas suelen experimentar un impacto ambiental significativo debido a la expansión urbana, la agricultura intensiva y otras actividades humanas; ayudando a evaluar cómo el crecimiento poblacional afecta el uso de recursos y la generación de residuos, lo que acelera la degradación del paisaje (Palacio et al., 2004).	
Porcentaje de superficie reforestada	UP-1, UP-2, UP-3, UP-4, UP-5, UP-6, UP-7, UP-8, UP-9, UP-10, UP-11, UP-12, UP-13, UP-14, UP-15, UP-16, UP-17, UP-18.
Es clave para evaluar la respuesta de los organismos públicos, su análisis permite medir la eficacia de las políticas ambientales y las iniciativas de restauración de ecosistemas. Un aumento en la superficie reforestada indica que los programas de reforestación están contribuyendo a la recuperación ambiental, mejorando la calidad del suelo, la biodiversidad y los ciclos hídricos (Semarnat, 2005).	
Población con acceso a agua potable	UP-1, UP-2, UP-3, UP-4, UP-11, UP-12, UP-14, UP-16, UP-17, UP-18.
Refleja el porcentaje de la población con acceso a agua potable, un incremento indica la implementación de medidas efectivas en el fortalecimiento de la infraestructura hídrica y el suministro de agua segura a un mayor número de personas (Semarnat, 2005).	

Fuente: elaboración propia en base a Atlas de indicadores ambientales y de sustentabilidad para América Latina y el Caribe (Winograd *et al.*, 1995) y Semarnat (2005).

4. Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio confirman tendencias ya observadas en investigaciones previas realizadas en otras regiones de México y América Latina. Tal como lo señala Canchola (2017), la integración de variables naturales y antrópicas permite delimitar unidades de paisaje con diferentes grados de transformación y vulnerabilidad, lo cual se ratifica en este caso mediante la identificación de 18 UP y su evaluación conforme a niveles de degradación.

Existe una marcada heterogeneidad espacial en los niveles de degradación, esta dualidad pone de manifiesto la urgencia de estrategias diferenciadas de manejo territorial que reconozcan la diversidad funcional del paisaje y las dinámicas socioambientales que lo afectan. Pesé a que los cambios a lo largo del tiempo no han sido tan significativos como se muestra en el estudio de dinámicas de cambio de uso de suelo (Castillo, 2018) existen limitaciones que deben considerarse derivadas de la calidad, resolución y actualización de la información disponible, tanto cartográfica como estadística. Estas limitaciones metodológicas, si bien no invalidan los resultados, sí resaltan la necesidad de fortalecer los sistemas de información ambiental municipal, mediante la incorporación de herramientas geotecnológicas, sensores remotos y plataformas de monitoreo continuo que integren datos ecológicos, físicos y sociales en tiempo casi real.

Por otra parte, se coincide con Mateo y Ortiz (2001) respecto a la utilidad de considerar la estructura vertical del paisaje como base para el diagnóstico ambiental, pues esta permite observar cómo las condiciones geomorfológicas, edáficas y climáticas influyen en la susceptibilidad a procesos de degradación. En esta investigación, las unidades con pendientes pronunciadas, alta energía del relieve y uso intensivo del suelo presentan mayores niveles de deterioro, lo que concuerda con el enfoque morfodinámico adoptado por autores como Bollo (2018), además de Morales *et al.* (2019).

En cuanto a los métodos de evaluación, la incorporación del nivel de antropización como factor cuantitativo clave, representa un aporte metodológico valioso. A diferencia de estudios anteriores que enfatizan principalmente el componente natural, este trabajo propone una relación directa entre la intensidad de los usos del suelo y el grado de degradación, lo que permite afinar la categorización de las UP y establecer subniveles dentro de cada rango de degradación. Esta propuesta resulta especialmente útil para municipios con fuertes contrastes entre zonas conservadas y transformadas, como Zinacantepec.

Sin embargo, en función de la experiencia adquirida, se identifican aspectos susceptibles de mejora. Por ejemplo, si bien el trabajo de campo fue fundamental para validar la información cartográfica, se recomienda incrementar la frecuencia y cobertura espacial de estas verificaciones, especialmente en zonas de transición entre unidades, donde los límites paisajísticos pueden ser difusos. Asimismo, la inclusión de variables temporales (como series de imágenes satelitales multitemporales) permitiría analizar tendencias de cambio más precisas y anticipar escenarios de evolución futura del paisaje.

Otro aspecto para considerar es la incorporación de variables socioeconómicas más específicas, como el nivel de marginación, la presión inmobiliaria o los patrones de movilidad poblacional, los cuales podrían enriquecer el análisis de las presiones sobre el paisaje. En este sentido, modelos como el IEDAN propuesto por Giraldo Rodríguez (2022), que integran componentes ecológicos y culturales en un marco sistémico, ofrecen referentes complementarios que podrían adaptarse al contexto local.

Finalmente, el desarrollo del tablero de indicadores PER representa una herramienta innovadora para la gestión ambiental municipal, al traducir los resultados del análisis geoecológico en instrumentos de monitoreo continuo. No obstante, para mejorar su eficacia se propone su articulación con plataformas geotecnológicas que permitan la actualización automatizada de datos, así como la capacitación de los responsables locales en el uso de los resultados para la toma de decisiones.

En conjunto, esta investigación reafirma la pertinencia del enfoque geoecológico para evaluar la degradación ambiental en escalas locales y regionales, asimismo sienta las bases para futuros trabajos que busquen profundizar en el análisis del paisaje desde una perspectiva integrada y aplicada a la gestión sostenible del territorio.

5. Conclusiones

Los resultados evidencian una correlación directa entre la morfología del relieve y los patrones de uso del suelo, en zonas de planicie y piedemonte que, por su accesibilidad y potencial agrícola, han sido objeto de intensa transformación antrópica, mostrando niveles de degradación de media a alta. En contraste, las unidades ubicadas en zonas montañosas, de difícil acceso y con pendientes pronunciadas, conservan mayor cobertura vegetal y menor intervención humana, lo que se refleja en niveles bajos de degradación.

Al incorporar el grado de antropización como indicador clave a la metodología, se generó una tipificación más refinada de la degradación ambiental. Se identificó que el 58.35% del municipio presenta signos incipientes de degradación media, mientras que un 14.75% ya manifiesta condiciones avanzadas de deterioro, lo cual debe ser atendido prioritariamente.

Asimismo, la implementación de un tablero de indicadores ambientales bajo el marco PER (Presión, Estado, Respuesta) proporciona una herramienta útil para el monitoreo continuo, la gestión de los recursos naturales y la planificación territorial. Indicadores como la tasa de deforestación, la relación cobertura natural/antrópica y la expansión de la frontera agrícola permiten identificar tendencias de presión y riesgo sobre el paisaje, ofreciendo una herramienta estratégica para el monitoreo permanente del estado del paisaje, permitiendo evaluar tendencias, anticipar escenarios de deterioro y medir la efectividad de las acciones implementadas, resultando esencial para la formulación de políticas basadas en evidencia, particularmente en ámbitos como el ordenamiento ecológico, la gestión del riesgo, la conservación de recursos naturales, el manejo del agua y la regulación de la expansión urbana.

La información generada a partir de la metodología geoecológica constituye una base técnica sólida para fortalecer la toma de decisiones en el ámbito público y local. La identificación detallada de las unidades de paisaje, junto con la delimitación de sus características ambientales, dinámicas morfodinámicas y niveles de degradación, permite reconocer con precisión las áreas del territorio que requieren atención prioritaria, regulación específica o intervenciones de restauración. Esta diferenciación espacial facilita la creación de instrumentos de política pública más ajustados a las capacidades y limitaciones reales del territorio.

Asimismo, la integración de variables ambientales, sociales y morfodinámicas posibilita una lectura integral del territorio, indispensable para orientar la gestión local hacia modelos de desarrollo más sostenibles. Los datos obtenidos pueden apoyar la priorización de zonas para programas de reforestación, el diseño de estrategias de mitigación y adaptación ante fenómenos naturales, la definición de criterios para autorizar cambios de uso del suelo y la planificación de infraestructura sustentable. En conjunto, la metodología no solo permite diagnosticar el estado actual del paisaje, sino que se convierte en una herramienta operativa para fortalecer la gobernanza territorial. Su carácter sistemático, replicable y espacialmente explícito facilita la construcción de agendas públicas integrales, contribuye a la coordinación interinstitucional y promueve un enfoque de planificación territorial que articula ciencia, gestión y participación ciudadana.

En síntesis, el enfoque geoecológico aplicado no solo permitió alcanzar el objetivo de evaluar la degradación ambiental a través del grado de antropización, sino también aporta un modelo metodológico replicable, integrando un análisis espacial que favorecen la toma de decisiones informadas y la gestión sostenible del territorio.

6. Agradecimientos

Expresamos sincero agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico que brindo para la realización de esta

investigación. Agradecemos a la Universidad Autónoma del Estado de México por su apoyo institucional y la infraestructura necesaria para llevar a cabo este proyecto, en especial a los Laboratorios LANOT y LaNCTIGeSSR, adscritos a la Facultad de Geografía.

7. Conflicto de intereses

Los/as autores/as de este trabajo declaran bajo protesta de decir la verdad que este es un trabajo original y que no existen conflictos de interés. Así mismo, los autores de este artículo nos responsabilizamos del contenido del mismo, donde se aplicaron las mejores prácticas éticas.

8. Referencias

- ASF Alaska Satellite Facility. (2010). Alos Palsar. <https://asf.alaska.edu/datasets/daac/alos-palsar/>
- Bollo-Manent, M. y Méndez, Wilfrido. (2018). El Estado del Medio Ambiente en Michoacán de Ocampo. México. Cuadernos Geográficos. 57. 10.30827/cuadgeo.v57i3.6504.
- Canchola Pantoja, Y. G. (2017). Propuesta Metodológica para el análisis y valoración geoecológica del paisaje. [Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma del Estado de México]. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/66175>
- Canchola Pantoja, Y. G. (2021). Antología comentada de un Manual para Trabajo de Campo de Geografía Ambiental. Universidad de Quintana Roo.
- Casa A., Gustavo y CONABIO (1997). Climas del Estado de México. CONABIO. http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/clima/climas/clima500kw
- Castillo Contreras, F. C. (2018) Dinámicas de cambio de uso de Suelo en el municipio de Zinacantepec, (1990 – 2016). Propuestas desde el enfoque del marco lógico para el

- manejo de recursos [Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México]. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/95240>
- CEPAL. Indicadores Biofísicos de Desertificación en la Puna. 2003. Disponible en: http://www.medioambiente.gov.ar/documentos/suelo/programas/pan/cepal_indicadores/actividades/03_taller_jujuy/indicadores_bio.PDF
- CETENAL Comisión de Estudios del Territorio Nacional, (1976) Edafología del Volcán Nevado de Toluca E-14-A-47.
- CIAT. Indicadores de sustentabilidad rural. 2001. Disponible en: www.ciat.cgiar.org/indicators/indicadores/campuj.htm
- Copernicus Open Access Hub, Imagen Sentinel 2A. Disponible en: https://browser.dataspace.copernicus.eu/?zoom=11&lat=45.36638&lng=12.49832&themeld=DEFAULT-THEME&visualizationUrl=U2FsdGVkX1%2FRAjMzJaRwpBAz5wUxhtaa5dBAeLQO1hYtNoiSlONu%2Bn7p854xfbMfjb0L9U7N0dqMM1c3tEXWtWuQZnEXj5TgGKLJN%2FqalqBnxqsO5K8N%2BvuQoIOdt4B%2B&datasetId=S2_L1C_CDAS&fromTime=2023-02-07T00%3A00%3A00.000Z&toTime=2023-02-07T23%3A59%3A59.999Z&layerId=1_TRUE_COLOR&demSource3D=%22MAPZEN%22&cloudCoverage=10&dateMode=SINGLE, consultada el 27 de enero de 2022.
- Delgado Peña, J. J., Damián Ruiz, J., Navarro Jurado, E., Cortes Macías, R., Remond Noa, R., Salinas Chávez, E., Fernández Lorenzo, J. M. y Acevedo Rodríguez, P. (2011). La degradación ambiental de los paisajes en las cuencas tributarias de la Ensenada de Sibarimar (Guanabo e Itabo, Cuba). Cuadernos Geográficos, 161-188.
- ERIC Extractor Rápido de Información Climatológica, (2008). Datos de Temperatura y Precipitaciones de Zinacantepec. Servicio Meteorológico Nacional y Comisión Nacional del Agua.

- Espinosa L. y Arroyo K. 2011. Geomorfología en México. Una visión histórica, metodológica y aplicada. Editorial Académica Española. ISBN 978-3-8454-9761-7, España. Saarbrücken Alemania.
- Giraldo Rodríguez, P. (2022). Análisis espacial de la degradación ambiental en Colombia. Enfoque teórico y metodológico. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/82048>
- Golubev, G. (2006). Geoecología. Moscú: ZAO Isdatielctbo "Aspekt Press". Moscú. (En ruso).
- INEGI y Semarnap-INE. (2000). Indicadores de desarrollo sustentable en México. México.
- INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2013). Continuo de Elevaciones Mexicano. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020a). Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR. <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>
- INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020b). Principales resultados por localidad (ITER). <https://www.inegi.org.mx/app/scitel/Default?ev=9>
- INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2024). Información topográfica <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>
- Martínez Serrano, A. y Bollo Manent, M. (2023). El paisaje. Una mirada a través del análisis espacial. Universidad Nacional Autónoma de México. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental y Escuela Nacional de Estudios Superiores Mérida. <https://doi.org/10.22201/ciga.9786073080033e.2023>
- Mateo-Rodríguez, J. M. (2002). Geografía de los Paisajes Primera Parte Paisajes Naturales. Ministerio de Educación Superior. Universidad de la Habana. Facultad de Geografía. La Habana.
- Mateo-Rodríguez, J. M. y Ortiz-Pérez, M.A. (2001). La degradación de los paisajes como concepción teórico-metodológica en J. L. Palacio Prieto; O. Orozco Oropeza; J. M.

- Figueroa Mah-Eng (Ed.), Mario Arturo Ortiz Pérez Contribuciones geográficas. Serie Varia, Nueva Época, No. 1. Instituto de Geografía. UNAM. México, D. F.
<http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/98/96/296-1>
- Lugo Hubp, José y M. A. Ortiz-Pérez. (1980) Análisis Geomorfológico-Estructural del Conjunto Montañoso de la Región de Cabo Corrientes. Jal. Boletín 1 y 2 de la Sociedad Geológica Mexicana Tomo XLI., Pp 1-13.
- Mateo-Rodríguez, J. M., Vicente da Silva, Edson., Cezar Leal, Antônio. (2012). Paisaje y Geosistema: apuntes para una discusión teórica. REVISTA GEONORTE, Edição Especial, V.4, N.4, p.239 – 251.
- Mateo-Rodríguez, J. M., Vicente da Silva, Edson., Cezar Leal, Antônio. (2012). Paisaje y Geosistema: apuntes para una discusión teórica. *REVISTA GEONORTE, Edição Especial, V.4, N.4*, p.239 – 251.
- Martínez Serrano, A. y Bollo Manent, M. (2023). El paisaje. Una mirada a través del análisis espacial. Universidad Nacional Autónoma de México. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental y Escuela Nacional de Estudios Superiores Mérida.
<https://doi.org/10.22201/ciga.9786073080033e.2023>
- Morales Iglesias, H., Priego Santander, A. G., Bollo Manent, M., y Ríos, M. J. (2019). La antropización de la cobertura vegetal en los paisajes del estado de Chiapas, México. Papeles de Geografía, (65), 139–154. DOI:
<http://dx.doi.org/10.6018/geografia.396571>
- Palacio-Prieto, J.L., Sánchez-Salazar, M.T., Casado Izquierdo, J.M., Propin Frejomil, E., Delgado Campos, J., Velázquez Montes, A., Chias Becerril, L., Ortiz Álvarez, M.I., González Sánchez, J., Negrete Fernández, G., Gabriel Morales, J., Márquez Huitzil, R., Niedo Manzano, T., Jiménez Rosenberg, R., Muñoz López, E., Ocaña Nava, D., Juárez Aguirre, E., Anzaldo Gómez, C., Hernández Esquivel, J.C., Valderrama Campos, K., Rodríguez Carranza, J., Campos Campuzano, J.M., Vera Llamas Cruz, H. Y Camacho

- Ramírez C.G. (2004). Indicadores para la caracterización y el ordenamiento territorial. Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Desarrollo Social, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional De Ecología. México.
- PNUD Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2024). Objetivos de Desarrollo Sostenible. México. PNUD. <https://www.undp.org/es/mexico/objetivos-de-desarrollo-sostenible>
- OECD. (1988). Towards Sustainable Development. Environmental Indicators. Paris, France.
- Ortíz-Pérez, M.A y G. Bocco V. (1989) Análisis morfotectónico de las depresiones de Ixtlahuaca y Toluca, México. vol. 28, núm, 3 Geofísica Internacional. UNAM.
- OECD. (2002). Environmental Data. Compendium 2002. France.
- Quiroga Martínez, Rayén. (2007). Indicadores ambientales y de desarrollo sostenible: avances y perspectivas para América Latina y el Caribe. CEPAL. Santiago de Chile.
- Semarnat Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2005). Indicadores básicos del desempeño ambiental de México: 2005. Semarnat. México. http://centro.paot.org.mx/documentos/semarnat/Indicadores_basicos_2005.pdf
- Semarnat Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2016a). Programa de Manejo Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Ciudad de México.
- Semarnat Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2016b). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave y desempeño ambiental desempeño ambiental y de crecimiento verde. Edición 2015. Ciudad de México. Semarnat. México. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf

- Strahler, A.N. (1952) Hypsometric (Area-Altitude) Analysis of Erosional Topography. Geological Society of America Bulletin, 63, 1117-1141.
[http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2)
- United Nations Environment. (2019). Healthy Planet, Healthy People. GEO 6: Nairobi. DOI 10.1017/9781108627146.
- Van Zuidam R. (1985). Aerial Photo-interpretación in terrain analysis and geomorphologic Mapping. ed. smits Publishers, the Netherlands.
- Vázquez Reyes, R. Geografía Física (1989). Arthur Newell Strahler.
- Verstappen and Van Zuidam. (1991). El Sistema ITC para Levantamientos Geomorfológicos. ITC Publicación Numero 10.
- Winograd, Manuel; Farrow, Andrew y Eade, Jeremy. (1995). Atlas de Indicadores Ambientales y de Sustentabilidad para América Latina y el Caribe. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).