

Geografía Aplicada

ISSN: 3061-8436

Volumen 2 ■ Número 1 ■ Febrero 2026





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, gestión Integral del Riesgo 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 2 ■ Número 1 ■ Febrero ■ 2026
<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. 2, Número 1, enero - junio 2026, 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, 05 de febrero de 2026.

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-SinObraDerivada 4.0 Internacional.

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

OPEN  ACCESS



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

SUMARIO

Calidad del agua y su distribución en la región sur del acuífero del Valle del Mezquital, Hidalgo	1
Liliana Téllez Peña, José Luis Expósito Castillo, Reyna María Guadalupe Fonseca Montes de Oca y María Vicenta Esteller Alberich	
Sistema de presas sustentables en cuencas para captar agua de lluvia, limpiarla y distribuirla por gravedad	26
María Milagros Campos Vargas y Carlos Alejandro Pérez García	
Comparación de métodos de relevamiento topográfico para el diseño de trabajo de campo con RPA/drone	50
Sonia Laura Lanzelotti, Federico Nicolás Chait, Eloy José Montes Galbán, Noelia Cecilia Principi y Marcelo Alejandro Lamamí	
Localización y distribución espacial de los centros de distribución en la Gran Región Centro de México: análisis megaregional	75
Oscar Alcocer García y Juan Campos Alanís	
Análisis de la calidad del agua de manantial: caso de estudio en el Estado de México	112
Ana Elisa Alcántara Valladolid, Juan Manuel Esquivel Martínez, Carolina Alvarez Bastida, Carlos Roberto Fonseca Ortiz, José Alfredo Flores Ronces	
Metodología aplicada para el cálculo de la degradación geoecológica: caso de estudio Zinacantepec	136
Rocio Endañu Segundo, Yered Gybram Canchola Pantoja, Clarita Rodríguez Soto y Néstor Corona Morales	
Análisis espacial del agave, condiciones edáficas y desplazamiento de cultivos tradicionales en la Región Centro de Jalisco	174
Guadalupe Quezada Chico, Martín Vargas Inclán, Raúl Acevedo Rosas, Juan Manuel Cuevas Elicerio y Ana Paola Izquierdo Saguilan	
Servicios ecosistémicos del sur del Estado de México	200
Luis Alfonso Flores Arteaga, Clarita Rodríguez Soto y Dolores Magaña Lona	
Evaluación de la vulnerabilidad futura de los acuíferos de México ante el cambio climático	231
Celso Rico Firo, José Luis Expósito Castillo, Miguel Ángel Gómez Albores, María Vicenta Esteller Alberich y Juan Manuel Esquivel Martínez	

Calidad del agua y su distribución en la región sur del acuífero del Valle del Mezquital, Hidalgo

Water Quality and Distribution in the Southern Region of the Aquifer of the Mezquital Valley, Hidalgo

Liliana Téllez Peña¹, José Luis Expósito Castillo^{1*}, Reyna María Guadalupe Fonseca Montes de Oca¹ y María Vicenta Esteller Alberich¹

¹Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) de la Universidad Autónoma del Estado de México, Carretera Toluca-Atlacomulco, km 14.5, Toluca, México, C.P. 50200. C.P. 50200, Itelles345@gmail.com, jlexpositoc@uaemex.mx, mgfonsecam@uaemex.mx, mvestellera@uaemex.mx, <https://orcid.org/0009-0001-1865-7161>, <https://orcid.org/0000-0002-5026-9302>, <https://orcid.org/0000-0001-6505-8252>, <https://orcid.org/0000-0002-5832-8741>

*Autor(a) de Correspondencia

Recibido: 17/09/2025. Aceptado: 20/12/2026. Publicado: 05/02/2026.

Cómo citar este artículo: Téllez Peña, L., Expósito Castillo, J. L., Fonseca Montes de Oca, R. M. G. y Esteller Alberich, M. V. (2026). Calidad del agua y su distribución en la región sur del acuífero del Valle del Mezquital, Hidalgo. *Geografía Aplicada*, 2(1), 1-25.

Resumen

La calidad del agua subterránea se ha visto comprometida por factores ambientales, industriales y geológicos, lo que hace necesaria una evaluación sistemática, en especial cuando esta se destina al uso y consumo humano (Instituto del agua, 2024). Bajo este

marco, el objetivo principal de la investigación fue evaluar la calidad del agua subterránea destinada al uso y consumo humano mediante el índice GWQI y analizar su distribución espacial en función de las condiciones hidrogeológicas del sur del acuífero del Valle del mezquital.

La metodología consistió en la aplicación del Índice de calidad del agua subterránea (GWQI), complementada con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) lo que permitió integrar y representar espacialmente los resultados de parámetros fisicoquímicos, comparando estos datos con las concentraciones máximas permitidas según la NOM-127-SSA1-2021 (DOF, 2022). Se analizaron un total de 19 muestras de agua provenientes de pozos, en las cuales se determinaron concentraciones de sulfatos, sólidos disueltos totales, pH, arsénico, hierro, flúor y nitratos.

Se generó una escala cualitativa para los resultados lo que indica que el 11 % de las muestras se encuentran en condiciones pésimas, el 10 % en mala calidad, el 37 % requiere tratamiento indispensable, el 26 % necesita tratamiento y el 16% puede considerarse de excelente calidad. Estos hallazgos constituyen una base técnica fundamental para el diseño de redes de monitoreo y la implementación de medidas de gestión orientadas a garantizar la seguridad del recurso hídrico y la salud pública mediante la implementación de estrategias de protección para los pozos de explotación.

Palabras clave: calidad del agua, índice GWQI, pozos, explotación, acuífero.

Abstract

Groundwater quality has been compromised by environmental, industrial, and geological factors, making a systematic evaluation necessary, especially when the water is intended for human use and consumption (Water Institute, 2024). Within this framework, the main objective of this research was to evaluate the quality of groundwater intended for human use and consumption using the Groundwater Quality Index (GWQI) and to analyze its spatial

distribution based on the hydrogeological conditions of the southern part of the Mezquital Valley aquifer.

The methodology consisted of applying the Groundwater Quality Index (GWQI), supplemented with Geographic Information System (GIS) tools, which allowed for the integration and spatial representation of the results of physicochemical parameters, comparing these data with the maximum permitted concentrations according to NOM-127-SSA1-2021 (DOF, 2022). A total of 19 groundwater samples collected from wells were analyzed, determining concentrations of sulfates, total dissolved solids, pH, arsenic, iron, fluoride, and nitrates.

The results showed that 11% of the samples were in poor condition, 10% in bad quality, 37% required essential treatment, 26% needed treatment, and 16% could be considered of excellent quality. These findings provide a fundamental technical basis for designing monitoring networks and implementing management measures aimed at ensuring the safety of the water resource and public health through the implementation of protection strategies for exploitation wells

Keywords: groundwater quality, GWQI Index, wells, exploitation, aquifer.

1. Introducción

La gestión del agua subterránea enfrenta desafíos significativos tanto en términos de cantidad como de calidad. Una administración adecuada no se limita únicamente a su extracción y consumo sino que también exige un monitoreo continuo de la calidad, considerando tanto la contaminación de origen natural como la provocada por actividades humanas (IMTA, 2022). Entre los principales factores de degradación destacan la minería, el uso de agroquímicos, las actividades industriales, la descarga de aguas residuales y la sobreexplotación de los acuíferos. Por ello, resulta indispensable establecer programas permanentes de monitoreo que permitan identificar oportunamente la presencia de contaminantes y orientar acciones de gestión para la preservación del recurso.

La contaminación de las aguas subterráneas constituye un factor determinante en la propagación de enfermedades. Los efectos sobre la salud se relacionan principalmente con la exposición prolongada a agentes patógenos, toxinas y compuestos químicos presentes en el recurso hídrico. La presencia de contaminantes fisicoquímicos y microbiológicos, tales como: fluoruro, arsénico, hierro y manganeso, entre otros, puede generar una amplia variedad de afecciones, que van desde fluorosis dental y lesiones dérmicas hasta un incremento en el riesgo de desarrollar enfermedades crónicas, incluidos ciertos tipos de cáncer, cuando la exposición persiste durante periodos prolongados (UNESCO, 2020).

El acuífero del Valle del Mezquital constituye uno de los sistemas hidrogeológicos más relevantes del estado de Hidalgo, por su extensión territorial y su papel en el abastecimiento de agua para actividades agrícolas y usos locales. Este acuífero se caracteriza por una dinámica de recarga fuertemente influenciada por la irrigación con aguas residuales, lo que lo convierte en un sistema particularmente vulnerable a procesos de contaminación (Hernández, 2023).

Este sistema hidrogeológico recibe aportes considerables de aguas residuales, una parte de dichos aportes proviene de aguas residuales tratadas descargadas por la Planta de Tratamiento de Atotonilco, mientras que otra fracción corresponde a aguas residuales sin tratamiento procedentes de la Ciudad de México y administradas por el organismo Aguas del Valle de México.

La infiltración constituye el principal mecanismo de recarga del acuífero, proceso favorecido por las prácticas de riego agrícola mediante canales principales y laterales, así como por los retornos de riego. La ausencia de revestimiento en estos canales incrementa sustancialmente la infiltración hacia el subsuelo y, en consecuencia, la incorporación significativa de aguas residuales al acuífero (Lesser-Carrillo et al., 2011).

La problemática relacionada con la disposición del agua subterránea en la región sur del acuífero del valle del Mezquital está estrechamente vinculada al incremento de fuentes

potenciales de contaminación, entre ellas las actividades agrícolas e industriales, los depósitos de residuos sólidos y la descarga de aguas residuales. Estas fuentes representan un riesgo significativo para la integridad del recurso hídrico, ya que contribuyen de manera directa a su deterioro. Como consecuencia, en distintas áreas del acuífero se han detectado concentraciones que superan los valores máximos permitidos conforme a la normatividad establecida para agua destinada al uso y consumo, particularmente en parámetros como sodio, sólidos disueltos totales, fluoruros, arsénico, plomo y coliformes fecales (Lesser-Carrillo et al., 2011).

En este contexto, el propósito de la investigación fue evaluar la calidad del agua subterránea mediante la aplicación del índice GWQI y analizar su distribución espacial en la región sur del acuífero del Valle del Mezquital, Estado de Hidalgo. Para ello, se emplearon herramientas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que facilitan la representación y el análisis espacial de los parámetros fisicoquímicos presentes en el recurso hídrico.

2. Metodología

2.1. Caracterización del área de estudio

El acuífero del Valle del Mezquital (Figura 1) tiene una extensión aproximada de 2 714 km² y se sitúa en la parte centro-sur del estado de Hidalgo, entre los paralelos 19°30' y 20°22' de latitud norte y los meridianos 98°56' y 99°37' de longitud oeste. Limita al norte con los acuíferos Ixquimilpan y Chapantongo-Alfajayucan; al este con Actopan-Santiago de Anaya y Ajacuba; al sur con Tepeji del Río; y al noroeste con Huichapan-Tecoautla, todos ellos ubicados en el estado de Hidalgo. Hacia el sureste colinda con el acuífero Cuautitlán-Pachuca, al suroeste con Ixtlahuaca-Atlacomulco y al oeste con Polotitlán, estos últimos pertenecientes al Estado de México (CONAGUA, 2024b).



La zona sur del acuífero del Valle del Mezquital se ubica en una región caracterizada por la presencia de valles fluviales, aluviales y lacustres, al encontrarse entre dos subprovincias fisiográficas: Lagos y Volcanes de Anáhuac. Con base en la clasificación climática de Köppen, modificada por Enriqueta García (1981), el área de estudio presenta dos tipos de clima: semiárido estepario cálido (BS1kw) y templado subhúmedo con verano fresco (C(w0)), ambos con un régimen de lluvias en verano (INEGI, 2021). La precipitación media anual es de aproximadamente 500 mm, mientras que la temperatura media anual oscila entre 8 °C y 16 °C (CONAGUA, 2023).

Hidrológicamente, la zona sur se localiza dentro de la Región Hidrológica 26 Pánuco, específicamente en la Subregión Hidrológica del río Tula, que integra la cuenca del río Moctezuma. La corriente principal es el río Tula, el cual recorre aproximadamente 6,551 km² antes de unirse con el río Tepeji en las estribaciones de la Sierra de la Catedral.

En cuanto al uso de suelo, el área de estudio presenta una distribución espacial heterogénea conformada por zonas urbanas, áreas de bosque denso y poco denso, cuerpos de agua, agricultura de riego y de temporal, minas en erosión, industrias, minas a cielo abierto y plantas de tratamiento de aguas residuales.

Desde el punto de vista geológico, el Valle del Mezquital está dominado por unidades de origen volcánico, asociadas a un ambiente geotectónico característico de un arco continental. Asimismo, se observan afloramientos de rocas sedimentarias correspondientes al Cretácico. En el contexto geotectónico, la zona de estudio se encuentra relacionada con procesos orogénicos vinculados a la Sierra Madre Oriental (CONAGUA, 2023).

La hidrogeología del acuífero del Valle del Mezquital (Figura 2) está conformada por secuencias marinas detríticas y calcáreas, intercaladas con valles fluviales y llanuras originadas en antiguas cuencas lacustres. Bajo estas condiciones, el acuífero se clasifica como libre a semiconfinado, debido a la presencia de depósitos lacustres. Dichos depósitos, por su alto grado de compactación, actúan como estratos prácticamente impermeables que limitan la infiltración y el flujo de agua subterránea (CONAGUA, 2024b).

En la zona sur del acuífero del Valle del Mezquital se concentra un número considerable de pozos de extracción. Sin embargo, para los fines de esta investigación se seleccionaron y muestrearon únicamente 19 pozos destinados al consumo humano (Tabla 1), distribuidos en cuatro municipios: Apaxco, en el Estado de México, y Atotonilco de Tula, Atitalaquia y Tula de Allende, en Hidalgo.

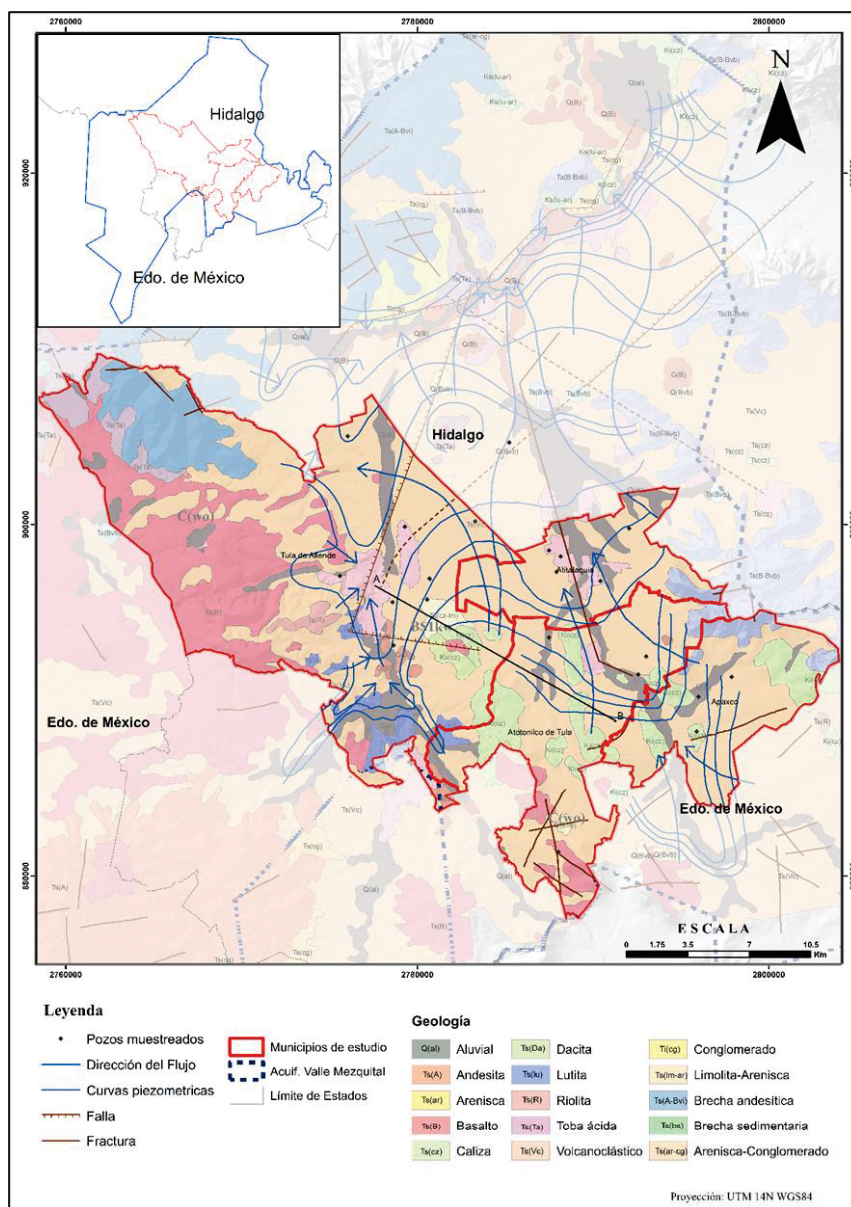


Figura 2. Mapa hidrogeológico del sur del acuífero del Valle del Mezquital, Hidalgo.

Fuente: elaboración propia con base en información tomada de CONABIO (2023).

Tabla 1. Pozos identificados en la región sur del acuífero del Valle del Mezquital.

Municipio Tula de Allende	Municipio Atitalaquia	Municipio Atotonilco de Tula	Municipio Apaxco
MZ-39	MZ-60	P-07	AP-01
MZ-68	MZ-104	MZ-89	AP-05
MZ-80	MZ-106	MZ-326	MZ-360
MZ-82	MZ-110	-	-
MZ-161	MZ-111	-	-
MZ-225	MZ-312	-	-
CN-2	-	-	-

Fuente: elaboración propia.

2.2. Método

Para el desarrollo de la presente investigación se establecieron cuatro etapas metodológicas sintetizadas en la figura 3. Dichas etapas permitieron caracterizar el área de estudio y la aplicar el índice GWQI, con el fin de evaluar la calidad del recurso hídrico y, a partir de ello, proponer medidas de gestión adecuadas.

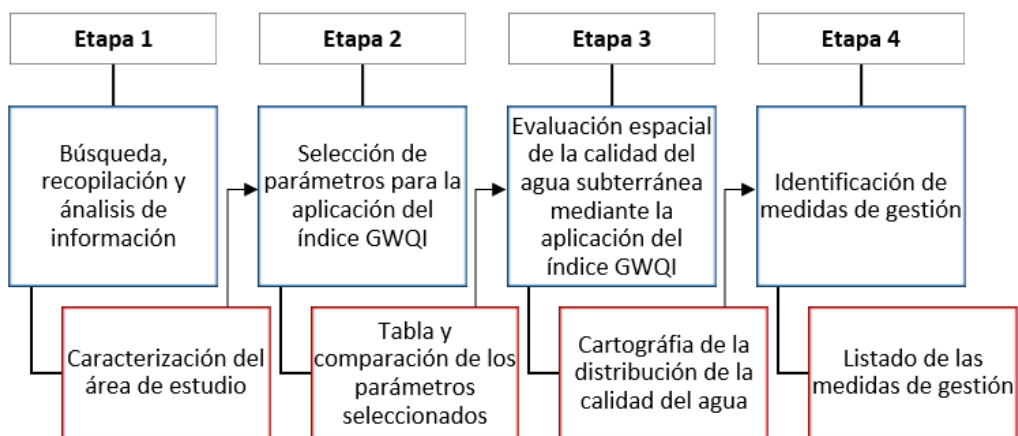


Figura 3. Diagrama metodológico.

Fuente: elaboración propia.

Etapas 1. Búsqueda, recopilación y revisión de la información disponible

En esta primera etapa se analizaron datos climatológicos, edafológicos, geológicos, hidrogeológicos, de uso de suelo y topográficos. Además, se consultaron diversas fuentes bibliográficas, entre ellas libros, revistas académicas y artículos científicos relacionados con indicadores de calidad del agua e hidrogeología, con el propósito de integrar una geobase sólida y elaborar la cartografía requerida.

Etapas 2. Selección de parámetros para la aplicación del índice GWQI

Para la ejecución de la etapa 2 fue indispensable realizar una selección de los parámetros que servirían como base para la aplicación del índice GWQI. Esta selección se sustentó en dos criterios principales: 1) el cumplimiento de la normatividad establecida “NOM-127-SSA1-2021”, relativa a la calidad del agua para uso y consumo humano, y 2) el riesgo que los parámetros fisicoquímicos figuran para la salud del ser humano al encontrarse presentes en las matrices ambientales, particularmente en el agua.

Con este propósito, se analizaron 30 parámetros (mayoritarios, minoritarios y traza) obtenidos durante la segunda etapa del proyecto Pronaii 318998, *“Evaluación de riesgo para la salud humana y ambiental por agentes tóxicos de origen antrópico como herramienta de empoderamiento social. Región Estratégica Ambiental Norte del Estado de México y Zona Tula, Hidalgo”*.

A partir de la base de datos, se seleccionaron los parámetros que cumplen con los siguientes criterios:

- Están contemplados en la NOM-127-SSA1-2021.
- Representan un riesgo potencial para la salud según su toxicidad, como es el caso de metales pesados, arsénico, plomo y fluoruro.
- Presentaron concentraciones relevantes en los pozos muestreados, lo que justifica su inclusión en el índice para reflejar con mayor exactitud el estado del agua.

Etapa 3. Evaluación espacial de la calidad del agua subterránea a través de la aplicación del índice GWQI.

Con base en los criterios establecidos en la etapa previa, se seleccionaron siete parámetros clave para evaluar la calidad del agua, considerando los límites definidos en la normatividad NOM-127-SSA1-2021. Para facilitar la interpretación de los resultados (Tabla 2), se diseñó un sistema de clasificación cualitativa, en el cual a cada parámetro se le asignó un color distintivo según su grado de cumplimiento con la norma.

Tabla 2. Clasificación cualitativa para la interpretación de resultados.

Color	Cumplimiento de la Norma
Verde	Concentraciones dentro del límite máximo permisible
Rojo	Concentraciones que exceden y se encuentran por debajo del límite máximo permisible

Fuente: elaboración propia.

La clasificación previamente descrita permitió generar mapas temáticos individuales para cada uno de los parámetros seleccionados, lo que a su vez facilitó la visualización de la distribución espacial de la calidad del agua por componente. Concluida esta etapa, se aplicó el índice GWQI, siguiendo la metodología propuesta por (Saeedi et al., 2010), y adaptada a las condiciones hidrogeológicas y normativas locales. Este índice ofrece una evaluación integral sobre la idoneidad del agua para consumo humano en los municipios de Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Tula de Allende y Apaxco.

Para el cálculo del GWQI se consideraron los siguientes parámetros: sulfatos, sólidos disueltos totales (SDT), pH, arsénico (As), hierro (Fe), fluoruro (F^-) y nitratos (NO_3^-). A cada parámetro se le asignó un peso ponderado (w_i) en función de su importancia relativa, determinado mediante la consulta a un panel de expertos en hidrogeoquímica e hidrogeología. Con base en estas evaluaciones, se estableció una escala de ponderación de 1 a 5, donde 1 corresponde a baja importancia y 5 a alta importancia. Finalmente, el peso

asignado a cada parámetro se definió aplicando la moda estadística, es decir, seleccionando el valor más frecuente entre las opiniones de los expertos.

Con base en las evaluaciones realizadas, se asignaron valores de peso ponderado en grado de 1 a 5, indicando que 1 es baja importancia y 5 alta importancia. Para determinar el peso final de cada parámetro se aplicó la medida estadística de la moda, seleccionando el valor más frecuente entre las calificaciones otorgadas por un grupo de expertos.

Posteriormente, se procedió a calcular el peso relativo (W_i) mediante el método del índice aritmético ponderado, el cual consiste en dividir el peso asignado a cada parámetro (w_i) entre la suma total de los pesos ponderados de todos los parámetros considerados. La formulación matemática de este procedimiento se muestra en la Ecuación 1.

$$W_i = w_i / \sum_{i=1}^n w_i \quad (1)$$

Posteriormente, se determinó la calificación de calidad (Q_i) de cada parámetro. Este indicador se obtuvo al dividir la concentración medida en laboratorio para cada muestra de agua (C_i) entre el valor máximo permitido por la NOM-127-SSA1-2021 para agua de consumo humano (S_i), y multiplicar dicho cociente por 100, conforme a lo establecido en la ecuación 2.

$$Q_i = (C_i / S_i) * 100 \quad (2)$$

Una vez determinados los valores de W_i y Q_i , se procedió a calcular el subíndice del i -ésimo parámetro (SI_i), el cual refleja la contribución individual de cada parámetro a la calidad del agua. Dicho subíndice se obtiene mediante la multiplicación del peso relativo (W_i) por la calificación de calidad (Q_i), conforme a lo establecido en la ecuación 3.

$$SI_i = W_i * Q_i \quad (3)$$

Finalmente se calcula el índice GWQI, mediante la suma de los subíndices de todos los parámetros analizados en la muestra, de acuerdo con la ecuación 4.

$$GWQI = \sum SI_i \quad (4)$$

Cabe señalar que el valor obtenido del índice permite clasificar la calidad del agua en relación con su idoneidad para el consumo humano. Esta clasificación se establece en cinco categorías: excelente, buena, regular, mala y pésima, de acuerdo con los rangos numéricos presentados en la Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación del rango del índice GWQI y categoría del agua.

Colores	Rangos	GWQI
	<50	Excelente
	50-100	Buena
	100-200	Regular
	200-300	Mala
	>300	Pésima

Fuente: elaboración propia con base en información de (Griffa et al., 2023).

Los valores obtenidos para cada muestra corresponden a los diferentes pozos ubicados en el área de estudio. Posteriormente, los resultados fueron integrados en un sistema cartográfico mediante los softwares QGIS y ArcGIS, lo que permitió representar de manera espacial la distribución de la calidad del agua subterránea en los municipios analizados.

Etapa 4. Identificación de medidas de gestión.

En la etapa final se formularon medidas de gestión basadas en la clasificación obtenida para cada pozo, lo que permitió establecer acciones de protección y alertar oportunamente a la población. Además, esta información constituyó un insumo fundamental para que las autoridades ambientales y especialistas en salud pública puedan tomar decisiones adecuadas.

3. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos ofrecen información clave que permite a los tomadores de decisiones diseñar y proponer estrategias de gestión y prevención en el uso del agua.

Etapas 1. Búsqueda, recopilación y revisión de la información disponible

La primera etapa permitió establecer un marco conceptual, aplicar las características del área de estudio y realizar un análisis de las fuentes consultadas, con el fin de orientar la implementación de la investigación (Tabla 4).

Tabla 4. Resultados del análisis de las fuentes de información.

Fuente	Insumo	Uso
UNAM, CONAGUA, ONU, IITCA, CONABIO, INEGI, IGECEM, TerraClimate	Se obtuvo información de los parámetros fisicoquímicos del agua, mayoritarios y minoritarios	Permitió conformar la geobase
CONABIO, INEGI, Servicio Geológico Mexicano, CONAGUA, USGS	Se obtuvieron las capas Shape de ubicación, hidrología geología, clima, y edafología	Permitió realizar la cartografía de la zona de estudio y comprender su funcionamiento

Fuente: elaboración propia.

Etapas 2. Selección de parámetros para la aplicación del índice GWQI

Los parámetros de análisis se seleccionaron en base en los límites establecidos en la normatividad vigente NOM-127-SSA1-2021 y en el nivel de riesgo que representan los elementos presentes en la matriz ambiental (agua) para la salud humana (Tabla 5).

Tabla 5. Selección de parámetros fisicoquímicos.

Parámetros	Límite permisible NOM-127-SSA-2021	Parámetros	Límite permisible NOM-127-SSA-2021
Sulfatos	400 mg/L	Hierro	0.30 mg/L
SDT	1000 mg/L	Flúor	1.50 mg/L
pH	6.5-8.5	Manganeso	0.15 mg/L
Aluminio	0.20 mg/L	Mercurio	0.006 mg/L
Arsénico	0.025 mg/L	Plomo	0.01 mg/L
Cadmio	0.005 mg/L	Nitrógeno de nitritos	0.90 mg/L
Cobre	2.00 mg/L	Nitrógeno de nitratos	11.0 mg/L

Fuente: elaboración propia.

Etapas 3. Evaluación espacial de la calidad del agua subterránea a través de la aplicación del índice GWQI

Una vez seleccionados los parámetros a analizar se elaboró la tabla 6 con el propósito de identificar y visualizar los parámetros cuya concentración excede los límites permisibles establecidos en la NOM-127-SSA1-2021.

Tabla 6. Clasificación de los parámetros fisicoquímicos con base en los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad vigente NOM-127-SSA1-2021

Clave	Nombre	SDT	pH	Sulfatos	Arsénico	Hierro	Flúor	N-Nitrato
Unidad de medida		(mg/L)		(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
AP-01	Pozo Bicentenario	372	7.6	14.3	ND	ND	0.53	3.4
AP-05	Pozo Tepetates	476	7.6	36.05	ND	ND	0.44	6.87
CN-2	Manantial Damu	942	7.1	102.89	0.19	0.01	1.37	15.52
MZ-39	Pozo Teocalco	1690	6.9	384.46	0.03	ND	0.41	21.11
MZ-60	Cerro Colorado	1302	6.9	210.28	0.02	ND	0.83	21.29
MZ-68	Pozo Insurgentes	1762	6.9	526.88	0.33	ND	1.81	13.5
MZ-80	Pozo Iturbe	1710	6.9	531.63	0.09	ND	1.04	12.26
MZ-82	Pozo Montecillo	898	6.9	92.93	0.2	ND	1.53	12.6
MZ-89	Pozo Progreso	1652	7.8	716.5	0.03	ND	0.8	6.27
MZ-104	Pozo El 18 De marzo	1720	7	819.05	0.09	0.02	1.52	5.34
MZ-106	Pozo El Tablón	1492	6.8	113.82	0.09	0.06	0.93	22.59
MZ-110	Pozo Dendho	2248	6.8	1054.11	0.09	0.01	1.19	9.6
MZ-111	Pozo Colonia Dedhó	1590	6.9	784.21	0.04	0.01	1.13	10.42
MZ-161	Pozo Manzanitas 1	944	7.1	270.54	ND	ND	0.62	12.18
MZ-225	Pozo Santa Ana Ahuehuepan (Bp100)	1102	7.2	183.98	ND	ND	0.71	20.02
MZ-312	Pozo Bojayito/1 Tlaxcoapan	1556	6.8	96.4	ND	0.02	0.25	24.79
MZ-326	Pozo El Refugio	1874	6.7	609.04	0.12	0.04	0.9	16.12
MZ-360	Pozo La Melga	786	7.1	215.93	0.11	ND	0.61	0.32
POZO-07	Pozo La Toscana	3600	6.3	1655.8	0.6	ND	2.63	0.28
Límite Máximo permisible de la NOM-127-SSA1-2021		1000	6.5-8.5	400	400	0.30	1.50	11.00

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se calculó el índice GWQI, el cual permitió asignar a cada pozo un color representativo según el valor obtenido. Esta clasificación facilitó la interpretación de la idoneidad del agua para consumo humano, conforme a los criterios establecidos en la tabla 7.

Tabla 7. Color según la idoneidad del agua para consumo humano.

Color	Rango	Significado
	<50	No requiere una purificación para su consumo.
	50-100	Agua con calidad aceptable (requiere una purificación mínima).
	100-200	Agua con calidad regular que podría presentar posibles riesgos a la salud (requiere un indispensable tratamiento de potabilización).
	200-300	Agua de calidad deficiente (presenta riesgo para la salud y no es recomendable para consumo humano).
	>300	Agua con una calidad pésima calidad (no es apta para el consumo humano).

Fuente: elaboración propia con base en información de Saeedi et al., 2010.

La tabla 8 muestra los resultados de la clasificación de la calidad del agua de los pozos analizados mediante el índice GWQI, asignándose un color a cada sitio conforme a los rangos establecidos en la tabla 7. Los resultados indican que en tres pozos (Bicentenario, Tepetates y Manzanitas 1) el agua es apta para consumo directo, sin requerir tratamiento adicional. En cinco pozos (Teocalco, Manantial Cerro Colorado, Progreso, Santa Ana Ahuehuepan y Bojayito), la calidad del agua se clasifica como buena, aunque se recomienda un proceso de purificación previo a su consumo.

En siete pozos (Iturbide, 18 de Marzo, El Tablón, Dendhó, Colonia Dendhó, El Refugio y La Melga) la calidad se considera regular, por lo que se requiere tratamiento indispensable antes de su uso. En dos sitios (Manantial Damu y Montecillo), el agua presenta una calidad mala, lo que representa un riesgo para la salud. Finalmente, en dos pozos (Insurgentes y La Toscana), la calidad del agua es pésima, por lo que no se considera apta para el consumo humano bajo ninguna circunstancia.

Una vez definidos los rangos por color, se procedió a calcular el porcentaje de muestras en función de los valores obtenidos del Índice de Calidad del Agua Subterránea (GWQI). En la figura 4 se observa la distribución porcentual de la calidad del recurso hídrico. Del total de pozos muestreados, el 16% presentó una calidad excelente, representada con tonalidad azul; el 26% mostró una calidad buena, asociada al color verde; mientras que el 37% se clasificó con condiciones regulares, identificadas con el tono amarillo. Por otro lado, el 10%

evidenció una calidad mala, correspondiente al color naranja, y el 11% restante reflejó una calidad pésima, representada en rojo.

Tabla 8. Clasificación del índice GWQI de acuerdo con los parámetros analizados.

GWQI	Nombre	Total
AP-01	Pozo Bicentenario	19.82
AP-05	Pozo Tepetates	25.38
CN-2	Manantial Damu	219.32
MZ-39	Pozo Teocalco	93.84
MZ-60	Cerro Colorado	81.29
MZ-68	Pozo Insurgentes	353.91
MZ-80	Pozo Iturbe	141.89
MZ-82	Pozo Montecillo	218.73
MZ-89	Pozo Progreso	89.32
MZ-104	Pozo El 18 De Marzo	162.52
MZ-106	Pozo El Tablón	172.89
MZ-110	Pozo Dendho	168.88
MZ-111	Pozo Colonia Dedhó	112.38
MZ-161	Pozo Manzanitas 1	46.94
MZ-225	Pozo Santa Ana Ahuehuepan (Bp100)	58.71
MZ-312	Pozo Bojayito/1 Tlaxcoapan	69.41
MZ-326	Pozo El Refugio	196.24
MZ-360	Pozo La Melga	119.68
AP-01	Pozo La Toscana	623.33

Fuente: elaboración propia con base en los resultados obtenidos.

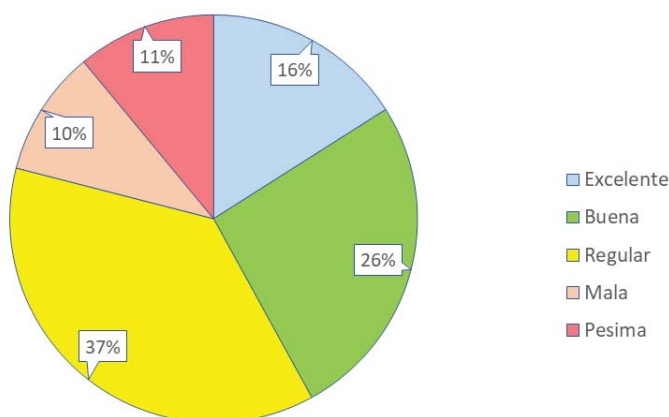


Figura 4. Distribución porcentual de los pozos según los rangos de clasificación del índice GWQI en el área de estudio.

Fuente: elaboración propia.

Cabe destacar que el 58% de los pozos muestreados presentan una calidad clasificada como regular, mala o pésima, lo que demuestra que no son aptos para el consumo humano sin un tratamiento previo adecuado. En la figura 5 se muestran los 19 pozos evaluados y su clasificación conforme al índice GWQI, evidenciándose diferencias significativas en la calidad del agua, aun cuando todos se localizan dentro de la zona urbana. En particular, el pozo-07, localizado en el municipio de Atotonilco de Tula, y el pozo MZ-68, ubicado en el municipio de Tula de Allende, registraron una calidad pésima, ya que cinco de los siete parámetros analizados (sulfatos, sólidos disueltos totales, arsénico, flúor y nitratos) excedieron los límites establecidos en la normatividad vigente NOM-127-SSA1-2021. En consecuencia, el recurso hídrico de estos pozos no puede destinarse al consumo humano.

Por otro lado, también se identificaron pozos con excelente calidad para los parámetros evaluados, principalmente en zonas del municipio de Apaxco y en algunas áreas de Tula de Allende. Asimismo, se observó que pozos con calidad buena, regular y mala se distribuyen a lo largo de los cuatro municipios estudiados, lo que refuerza la necesidad de implementar procesos de potabilización que garanticen un uso seguro del recurso.

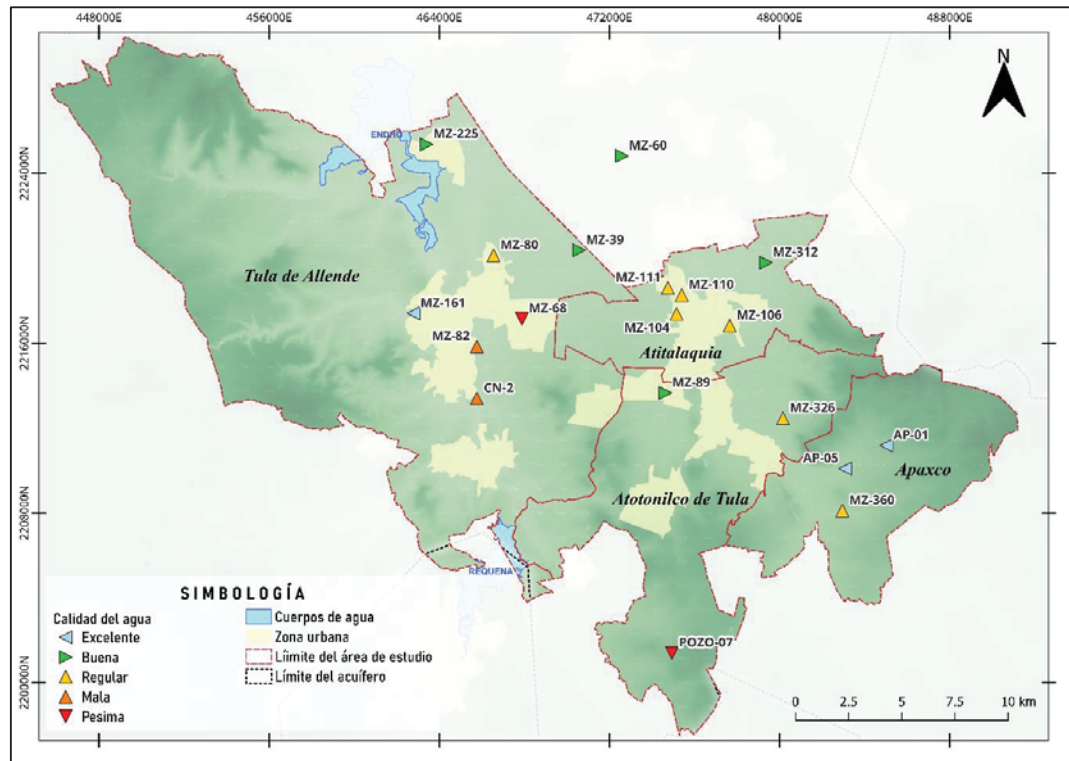


Figura 5. Mapa de la clasificación de la calidad del agua subterránea.

Fuente: elaboración propia.

Etapas 4. Identificación de medidas de gestión

Algunas de las principales medidas para el control y mitigación de la contaminación del agua subterránea son:

- Monitoreo regular: Establecer un control constante de la calidad del agua en los puntos más críticos, a fin de detectar de manera temprana las fuentes de contaminación y atenderlas oportunamente.
- Uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG): Aplicar herramientas SIG para ordenar espacialmente las actividades con mayor potencial contaminante,

identificar zonas vulnerables y localizar drenajes que favorezcan la contaminación por nitratos.

- **Concientización y educación:** Desarrollar campañas educativas dirigidas a la población para informar sobre los riesgos asociados al consumo hídrico contaminado, fomentando prácticas seguras en el manejo y uso del recurso.
- **Tratamiento de aguas residuales:** Implementar sistemas locales de tratamiento que reduzcan la carga de contaminantes antes de que estos alcancen los acuíferos.
- **Control de vertidos industriales y agrícolas:** Regular y supervisar descargas provenientes de industrias, actividades agrícolas y sitios de disposición de residuos, para minimizar el impacto en la calidad del recurso hídrico subterráneo.
- **Diversificación de fuentes de abastecimiento:** Promover el uso de fuentes alternativas de agua que permitan disminuir la presión sobre los acuíferos y garantizar un suministro seguro para el consumo.
- **Fortalecimiento normativo:** Reforzar la legislación vigente en materia de calidad del agua, asegurando su cumplimiento mediante inspecciones, regulaciones y sanciones efectivas a quienes provoquen daños al recurso.
- **Investigación y desarrollo:** Impulsar la investigación científica y el desarrollo de tecnologías innovadoras que favorezcan un mejor conocimiento, monitoreo y protección del agua destinada al uso humano.

4. Conclusiones

Los monitoreos de calidad del agua constituyen una herramienta esencial para generar información confiable sobre el estado del recurso hídrico e identificar oportunamente los problemas asociados a su contaminación.

El índice GWQI resulta particularmente útil para la evaluación integral de la calidad del agua; sin embargo, para que mantenga una efectividad este debe depender de la adecuada selección de los parámetros incluidos en el análisis, así como de la calidad y representatividad de los datos disponibles.

El análisis realizado permitió caracterizar de manera general los parámetros del agua destinada al uso y consumo humano en los municipios de Atitalaquia, Atotonilco, Tula de Allende y Apaxco.

A partir del índice GWQI, se determinó que la calidad del agua para consumo humano es aceptable en solo el 42% de los pozos analizados, los cuales requerirían únicamente un tratamiento mínimo. En contraste, el 58% restante presenta condiciones clasificadas como regulares, malas o pésimas. Esta situación se asocia principalmente con las altas concentraciones de sólidos disueltos totales, sulfatos, arsénico, flúor y nitratos detectadas en los pozos del área de estudio.

La calidad del agua subterránea en la zona de análisis está fuertemente influenciada por la litología local y los procesos geológicos asociados. La predominancia de aguas bicarbonatadas, mixtas y sódico-magnésicas coincide con la presencia de unidades hidroestratigráficas basálticas y zonas de recarga superficial, lo que refleja una interacción agua-roca controlada por la mineralogía del acuífero. Los resultados indican que las concentraciones elevadas de arsénico (As) y fluoruro (F^-) se asocian principalmente a un origen geogénico, vinculado a procesos hidrotermales, disolución de minerales portadores y flujos ascendentes a través de fracturas y fallas, más que a aportes antropogénicos. Esto se evidencia en su correlación con parámetros geológicos y térmicos observados en los pozos.

En contraste, el nitrato ($N-NO_3^-$) presenta un claro origen antropogénico, derivado de prácticas agrícolas, infiltración de aguas residuales y actividades urbanas, lo que resalta la influencia combinada de factores naturales y humanos sobre la calidad del agua. En

conjunto, estos hallazgos confirman que la litología y la estructura geológica desempeñan un papel clave en la movilidad de As y F⁻, mientras que la contaminación por nitratos responde a presiones antrópicas recientes. Esta integración de procesos naturales y actividades humanas subraya la necesidad de estrategias de manejo del acuífero que consideren tanto la dinámica hidrogeológica como las fuentes locales de contaminación.

La presencia de contaminantes (en especial sulfatos, sólidos disueltos totales, arsénico y flúor) en concentraciones que superan los límites establecidos por la normatividad vigente NOM-127-SSA1-2021 representa un riesgo para la salud. El consumo prolongado de agua con estas características puede ocasionar diversos padecimientos, como problemas gastrointestinales, metahemoglobinemia en bebés, niños y adultos, fluorosis dental, alteraciones en el crecimiento óseo, cáncer, lesiones cutáneas, enfermedades cardiovasculares y diabetes, según lo documentado por la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR, 2017).

El mapa elaborado facilita una visualización clara de la localización y calidad del agua en cada uno de los pozos evaluados, lo que permite una interpretación eficiente de la información espacial. Los datos representados constituyen una herramienta valiosa para identificar las características del recurso hídrico y respaldar la toma de decisiones orientadas a implementar tratamientos adecuados, así como a explorar fuentes alternativas de abastecimiento.

5. Agradecimientos

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti) por el apoyo brindando a través de la beca otorgada.

Al Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) por el respaldo institucional de generar esta investigación aplicada en el acuífero del Valle del Mezquital en beneficio a la comunidad.

Al proyecto Pronaii 318998, “Evaluación de riesgo para la salud humana y ambiental por agentes tóxicos de origen antrópico como herramienta de empoderamiento social. Región Estratégica Ambiental Norte del Estado de México y Zona Tula, Hidalgo” por las gestiones y facilidades con los recursos que se asignaron a este proyecto para poder llevar a cabo la investigación

A todos los colaboradores, que formaron parte de este proyecto e hicieron lo posible para que se llevara a cabo en especial agradecimiento al Dr. José Luis Expósito Castillo, la Dra. Reyna María Guadalupe Fonseca Montes de Oca y la Dra. María Vicenta Esteller Alberich.

6. 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.

7. Referencias

ATSDR. (1 de 07 de 2017). *Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades*.

Obtenido de

https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts204.html#:~:text=El%20nitrato%20y%20el%20nitrito%20se%20disuelven%20f%C3%A1cilmente,el%20agua%20de%20la%20superficie%20y%20agua%20subterr%C3%A1nea.

CONABIO. (2023, marzo 10). *Portal de Información Geográfica—CONABIO*. Comisión

Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).

<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

CONAGUA. (2023). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero

Valle del Mezquital (1310), Estado de Hidalgo. *SIGAGIS*. Obtenido de https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/hidalgo/DR_1310.pdf

CONAGUA. (2024b). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero*

Valle del Mezquital (1310), estado de Hidalgo.

<https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Edos/hidalgo/hidalgo.html>

DOF. (2022). *NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano.* <https://sidof.segob.gob.mx/notas/docFuente/5650705>

Griffa, C., Boglione, R., Panigatti, C., y Schierano, M. (2023). *Índice de calidad de aguas subterráneas en la región centro oeste de la provincia de Santa Fe, Argentina.*

https://www.researchgate.net/publication/374842404_Indice_de_calidad_de_aguas_subterraneas_en_la_region_centro_oeste_de_la_provincia_de_Santa_Fe_Argentina

Hernández, M. (2023, junio 22). Investigadores detectan contaminación del suelo y agua en el Valle del Mezquital. *Gaceta UNAM*. <https://www.gaceta.unam.mx/advierten-de-contaminacion-del-suelo-y-agua-del-valle-del-mezquital-a-cause-de-aguas-residuales/>

IMTA. (2022). *La gestión del agua subterránea: Hacer visible lo invisible.* gob.mx. <http://www.gob.mx/imta/articulos/la-gestion-del-agua-subterranea-haciendo-visible-lo-invisible>

Instituto del agua. (2024, enero 20). *Calidad del Agua en Fuentes Subterráneas: Una Guía Completa para Entender su Importancia y Cómo Asegurarla.* *Instituto del Agua.* <https://institutodelagua.es/calidad-del-agua/calidad-del-agua-en-fuentes-subterraneascalidad-del-agua/>

Lesser-Carrillo, L. E., Lesser-Illades, J. M., Arellano-Islas, S., y González-Posadas, D. (2011).

Balance hídrico y calidad del agua subterránea en el acuífero del Valle del Mezquital,

México central. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 28(3), 323–336.

Saeedi, M., Abessi, O., Sharifi, F., and Meraji, H. (2010). Development of groundwater

quality index. *Environmental Monitoring and Assessment*, 163(1–4), 327–335.

<https://doi.org/10.1007/s10661-009-0837-5>

UNESCO. (2020). *Agua y cambio climático* (p. 259) [Informe Mundial de las Naciones Unidas

sobre el Desarrollo de los Recurso Hídricos].

https://aguaysaneamiento.cndh.org.mx/Content/doc/Normatividad/Informe_Agua_Cambio_Climatico.pdf

Sistema de presas sustentables en cuencas para captar agua de lluvia, limpiarla y distribuirla por gravedad

Sustainable Dam System in Watersheds to Capture Rainwater, Clean it, and Distribute it by Gravity

María Milagros Campos Vargas^{1*} y Carlos Alejandro Pérez García²

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. mcamposv724@profesor.uaemex.mx, <https://orcid.org/0009-0008-6781-6414>

² Empresa Idea Geomatica SA de CV Las Chiapanecas 390 Int 2. Col. Benito Juárez. Nezahualcóyotl. Estado de México. CP 57000. eozar@yahoo.com, <https://orcid.org/0009-0005-0551-3256>

*Autor(a) de Correspondencia

Recibido: 15/09/2025. Aceptado: 12/01/2026. Publicado: 05/02/2026.

Cómo citar este artículo: Campos Vargas, M. M. y Pérez García, C. A. (2026). Sistema de presas sustentables en cuencas para captar agua de lluvia, limpiarla y distribuirla por gravedad. *Geografía Aplicada*, 2(1), 26-49.

Resumen

La propuesta plantea el diseño de un modelo de gestión colaborativa como alternativa de solución en materia de recursos hídricos, enfocado a la recuperación de agua de lluvia en zonas de recarga. El modelo se construye bajo una visión que integra el campo de la

hidrología, biología e ingeniería hidráulica para mayor precisión disciplinar, así como en el entendimiento sobre procesos socioeconómicos, culturales y políticos que intervienen en su gestión. El objetivo de la investigación va en dos sentidos; por un lado, se busca brindar la posibilidad de una gestión económica que beneficie a la población de bajos recursos con problemas de desabasto de agua potable; y por otro lado, se trata de impulsar proyectos con perspectiva sustentable y de prevención de escases, los resultados brindan un estudio integral de solución en cuanto a la gestión del recurso, que apoya a las comunidades que sean vulnerables a un sistema ineficiente de distribución de agua. En conclusión, se propone contemplar una visión que logre que tanto los gobiernos como las comunidades cuenten con elementos básicos para estar preparados en caso de tener que afrontar una situación severa de crisis de agua.

Palabras Clave: Sustentabilidad, modelo de gestión, tecnificación, manejo de agua, visión comunitaria.

Abstract

The proposal suggests the design of a collaborative management model as an alternative solution for water resources, focused on rainwater harvesting in recharge zones. The model is built on a vision that integrates the fields of hydrology, biology, and water engineering, as well as an understanding of the socioeconomic, cultural, and political processes involved in its management. The research objective is twofold: first, to provide the possibility of economic management that benefits low-income populations with drinking water shortages; and second, to promote projects with a sustainable perspective and the prevention of water scarcity. The results provide a comprehensive study of solutions for water resource management, supporting communities vulnerable to an inefficient water distribution system. In conclusion, it is proposed to consider a vision that ensures both governments and communities have the basic elements to be prepared in case they have to face a severe water crisis.

Keywords: Sustainability, management model, technology implementation, water management, community vision.

1. Introducción

En la actualidad uno de los temas cruciales a nivel global es el aprovechamiento, manejo y gestión del agua, circunstancia que se entiende como un tema ambiental y en el que la idea principal gira en la creciente escases del líquido a nivel mundial. Dentro de este contexto, la investigación utiliza el argumento de la correlación de lo social y lo biológico desde una postura científico-técnica, en el que, el hombre produce cambios radicales en las condiciones naturales, cambios que, a su vez ejercen presión, y en el que se acentúa la responsabilidad de la humanidad en la protección del medio ambiente (Fedoseev, 1978).

En este contexto la idea que se persigue en esta investigación se refiere a delinear una propuesta de gestión integrada de los recursos hídricos desde una perspectiva de desarrollo sustentable. Donde, la unidad territorial del análisis es la cuenca, ya que de acuerdo Dourojeanni et al. (2002), esta es ampliamente aceptada para la planificación integrada del recurso hídrico, siendo el punto de partida para coordinar acciones adecuadas a la provisión eficiente y de conservación del recurso, mediante estructuras participativas de coordinación y concentración de actores locales en la formulación de decisiones sobre la gestión de agua en el ámbito de cuenca.

Con base en lo antes mencionado, la propuesta trabaja en tres ejes principales de base sustentable; el primero consiste en proveer y/o desarrollar un sistema económico y eficiente de autogestión del recurso; segundo brindar una alternativa adecuada para un abasto más accesible y equitativo del líquido a comunidades de bajos recursos y/o con limitantes de accesos orográficos, y tres, promover la prevención de escenarios de desastres, emergencias, escases y desabasto.

El proyecto está dirigido a localidades que se ubican en zonas de difícil acceso debido a condiciones orográficas de laderas escarpadas y pendientes pronunciadas, en las cuales, se

problematiza el abastecimiento de agua y obstaculiza el suministro al requerir sistemas robustos y de alto costo para el bombeo y re-bombeo, la extracción y el traslado del líquido.

El trabajo se puede considerar como una alternativa que toma como ejes de acción el cuidado de la tierra y la comunidad, esto, desde una perspectiva de sostenibilidad, atractiva tanto para las autoridades locales como para las comunidades en su conjunto. Se integra en dos fases, la primera corresponde a talleres comunitarios con perspectiva colaborativa y la segunda al proceso de construcción del sistema de micro presas. En ambas fases, se tiene como resultado el diseño de las propuestas de acción. Con el modelo se busca aportar a una distribución equitativa del recurso y minimizar efectos negativos en cuanto a la desecación de manantiales y el detrimento de fuentes de agua y daños a la infraestructura de las ciudades causados por la subsidencia, inundaciones, entre otros.

1.1. El problema del agua

De acuerdo con la UNESCO (2020) las causas de primer orden que intervienen en la situación crítica del agua corresponden a los efectos del cambio climático, la contaminación y la explotación intensiva de acuíferos para actividades agrícolas e industriales; como muestra de esta situación se tiene que han incrementado los eventos extremos como son las sequías e inundaciones, lo que repercute en su disponibilidad, también el crecimiento poblacional y la creciente urbanización ejercen presión sobre los sistemas de saneamiento, acrecentando problemas de contaminación (UNESCO, 2021).

En México la principal problemática es la contaminación de las aguas superficiales (ríos, arroyos, lagos, lagunas, etc.) por aguas servidas y/o residuales domésticas, industriales, agrícolas o ganaderas. En cuanto a las aguas subterráneas (acuíferos), se encuentran en sobreexplotación, para 2018 el 18 % ya se encontraban en esta situación, lo que eleva los costos de extracción y subsidencia del terreno y un 5 % tiene problemas de salinización lo que deteriora los parámetros de calidad. Finalmente, otro tipo de recurso que se ve afectado es la precipitación, ya que el régimen de lluvia registra aproximadamente de 1.5

millones de hm^3 de precipitación anual, concentrándose el 67% durante los meses de junio a septiembre, de los cuales, el 72% vuelve a la atmósfera por evaporación, el 22% se concentra en escurrimientos superficiales, y el 6% restante se infiltra de manera natural al subsuelo, favoreciendo en gran medida la recarga acuífera (Instituto Mexicano para la Competitividad, 2023). Sin embargo, de acuerdo con Chávez et al. (2014) estas condiciones se ven amenazadas, debido a que el 29.61% de la superficie continental del país se considera altamente sensible ante las oscilaciones climáticas, lo que significa un incremento de $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, suficiente para provocar afectaciones en el 34.65% de estas superficies, reubicándolas en regiones con mayor temperatura y con menor disponibilidad de humedad.

San Juan Flores (2025) presenta un ejemplo claro de la afectación que se tiene en el sistema hídrico de México, en el que el sistema Cutzamala (embalse que provee a la cuenca de la Ciudad de México), muestra una capacidad de almacenamiento ubicada en 32.5% por debajo de la media histórica, en la actualidad se cuenta con 344.5 millones m^3 de agua cuando el promedio histórico para 1996 y 2020 era de 510.4 millones, lo que genera la reducción de los recursos hídricos, el deterioro de la calidad del agua y un saneamiento insuficiente, condiciones que dan lugar a problemáticas sociales que impacta en su mayoría a las poblaciones de bajos recursos. De acuerdo con Pedrozo (2021) estos impactos van directo al desarrollo económico ya que estos dependen del abasto de agua.

Por otro lado, en México son los grandes sistemas de presas el modelo tradicional para la gestión de los recursos hídricos, esto las coloca como beneficiosas o necesarias desde su función de administración, sin embargo, su construcción, operación y mantenimiento van acompañados de costos físicos como la alta evaporación, la baja infiltración, la sobrecarga de flujo de sólidos, y/o el alto potencial de sedimentación dentro del embalses.

En cuanto a los impactos socioambientales, este tipo de sistemas pueden provocar evento de inundación reflejando que la infraestructura es limitada y no cuenta con la capacidad para regular el caudal del río, derivando en desbordamientos o avenidas extraordinarias,

además de la disminución de agua durante breves periodos de sequía (Aboites Aguilar, 2012).

Un ejemplo de lo antes mencionado es el caso presentado en la Ciudad de México y en su área metropolitana donde se supera la capacidad para una planeación y administración adecuada del agua (Ángeles-Serrano et al., 2008) circunstancia que se refleja en la sobre explotación de los acuíferos debido a la marcada dependencia de los sistemas distantes como el Lerma y el Cutzamala, que suministran el 29 % del total del agua destinada a su consumo (Bernardino, 2017).

Como se puede observar los desafíos son importantes en términos de gestión, lo que hace necesario abordar las problemáticas desde una visión intersectorial (Castro, 2025). En este sentido, se requiere desarrollar una gestión integral que se centre en la investigación científica e innovación tecnológica en apoyo a la construcción de propuestas que integren sistemas económicos y eficientes de autogestión, siendo esto, una alternativa adecuada para lograr un abasto más accesible y equitativo, así como, la prevención de escenarios de desastres, emergencias, escases y desabasto.

1.2. La gestión del agua con perspectiva sustentable y colaborativa

La intervención de múltiples actores en distintos niveles en combinación con la fragmentación del recurso hídrico da lugar a diversas problemáticas relacionadas con la escasez del agua, por lo que es imperante la integración de prácticas mediante mecanismos de gobernanza hídrica, que fomenten la conservación de la biodiversidad, mejoren la resiliencia ecosistémica y garanticen la equidad social (Cabral et al., 2024).

La idea es proponer recomendaciones desde una visión científico-técnica que fortalezca las prácticas de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, donde el enfoque sea dirigido a involucrar la contribución de agentes importantes, destacando al gobierno, las comunidades locales y organizaciones, con la finalidad de brindar una gestión equilibrada del recurso (Wezel et al., 2020).

De acuerdo con Ostrom (2014) la coordinación entre diversos centros de decisión que sean distribuidos autónomamente entre los actores principales, son necesarios para lograr una gestión integrada del recurso contemplando las necesidades específicas, consiguiendo una adaptabilidad a diferentes escalas.

Para México la implementación de esta modalidad de gobernanza podría favorecer la participación de las comunidades rurales dentro de la administración y aprovechamiento del agua, mediante procesos flexibles que incorporen las particularidades socioculturales. Bajo esta perspectiva la sostenibilidad no solo remite el cuidado, disponibilidad y calidad del agua, sino también a la participación comunitaria y la construcción de conocimiento compartido (Castro, 2025).

Este trabajo aborda el diseño de un modelo de gestión sostenible del agua mediante la implementación de prácticas de ingeniería y gobernanza ambiental como alternativa a las consecuencias negativas a nivel social y ambiental del uso y manejo del agua.

2. Metodología

El modelo de gestión sustentable y colaborativa de recursos hídricos en zonas de montañas se plantea en dos fases principales. La primera consiste en el diseño técnico de las micro presas de provisión de agua, bajo el esquema de captación de agua de lluvia, potabilización por medios biológicos (Wen, 2024), bajo consumo de bombeo, y distribución por gravedad.

En un segundo momento se trabaja sobre la delineación y/o la propuesta de autogestión del sistema por parte de la población civil.

2.1. Diseño e instalación y funcionamiento de las micro presas

En este apartado se explica la construcción y funcionamiento de las Micro presas en diferentes etapas:

1. Planificación en cuanto a la definición de las necesidades de agua y energía, así como los objetivos de la construcción (almacenamiento, distribución);

2. Diseño del proyecto ejecutivo de costos del sistema de presas, de la planta de tratamiento y del tanque de almacenamiento;
3. Modelado de simulación del comportamiento del sistema de presas para optimizar el diseño;
4. Análisis de prefactibilidad que asegure se construya en tiempo previsto y a costos aceptables;
5. La ingeniería básica que integra criterios de seguridad contemplando la estabilidad estructural, la resistencia frente a sismos previstos, minimización de sismicidad inducida y evaluación de impacto ambiental, entre otros aspectos;
6. La rentabilidad asociada a los niveles de almacenamiento que permitan la operatividad del diseño durante su vida útil, misma que debe ser de al menos 30 años o más (León-Escobedo, 2024);
7. Selección del emplazamiento y evaluación del sitio adecuado para el establecimiento de la presa, considerando factores como: la profundidad, superficie de captación, la geología del terreno, y la ausencia de fracturas rocosas que puedan causar fugas;
8. Evaluación de Impacto Ambiental, a partir de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente;
9. Permisos para realizar obras de infraestructura hidráulica en el que la metodología y los pasos a seguir están basados y estructurados de acuerdo con el trámite “Permiso para realizar obras de infraestructura hidráulica en cauces y zonas federales” que se presentaron mediante un proyecto ejecutivo en la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2019).

La información que se genera para la instalación de las micro presas contempla diferentes áreas de investigación, que se mencionan a continuación.

La cartografía de las secciones transversales de topografía: trazos que se levantan a cada 20 metros a lo largo del río, dibujados en una cuadrícula escala de 1:100 o menor tanto horizontal como vertical, en sentido de encadenamiento que irá de aguas arriba hacia aguas abajo.

La geología regional y de la zona de trabajo por medio de sondeos, pruebas del laboratorio; se trata de levantamiento geológico, utilizando fotografías aéreas, imágenes satelitales y bases topográficas. Este estudio es la base para los estudios, de hidrogeología, recursos minerales, energéticos, ordenamiento territorial, vulcanología y peligros geológicos.

Los estudios geotécnico-estructurales incluyen análisis en ambas márgenes del río donde se realiza la obra, se incluye el análisis de los contactos entre las unidades geológicas, la ubicación de fallas ocultas bajo sedimentos y suelos en laderas, y por supuesto, las aceleraciones de las ondas sísmicas en conjunto con los parámetros elásticos dinámicos de las rocas. En esta labor, se contempla la aplicación de dos métodos geofísicos: el geoelectrico y el sísmico de refracción. Esta dualidad metodológica contribuye a la complementación del modelado geológico, facilitando la identificación de zonas donde existen fallas, cuerpos de agua, áreas de material arcilloso y sistemas kársticos subterráneos. Además, este método contribuye a mejorar la caracterización litológica del área estudiada y de sus materiales presentes. En cuanto al análisis de los costos de exploración indirecta mediante geofísica, se considerarán únicamente las técnicas del tendido de refracción sísmica (TRS) y del sondeo eléctrico vertical (SEV) consideradas fundamentales para el estudio del subsuelo en zonas destinadas a presas (Vázquez, *et al.*, s. a.)

Técnicas geofísicas de exploración indirecta y semi-indirecta en pozo, que incluyen: la tomografía eléctrica, cross-hole, tomografía sísmica entre pozos, gravimetría, magnetometría y registros geofísicos de pozo. Es relevante mencionar que el método de tomografía eléctrica se identifica como una técnica secundaria misma que ha cobrado relevancia en las exploraciones de presas, junto con la tomografía sísmica entre pozos.

La cartografía del riesgo geológico de desestabilización de laderas, aplicando métodos de compresibilidad y bolsones de alta presión de poro, sondeos de barrenación para obtener información directa a partir de la excavación de socavones en forma de galerías que den guía con mayor precisión acerca de la presión de agua, e indiquen los principales sistemas de fallas, propiedades geométricas del sustrato rocoso, esto con el objetivo de conocer de forma detallada dentro de un marco geológico local las márgenes del río donde se debe llevar a cabo la investigación y dar continuidad a zonas de fractura.

Finalmente, y de acuerdo con los requisitos y recomendaciones de la Comisión Nacional del Agua, se construyeron los planos de proyecto del arreglo conceptual de las obras, el plano general y la localización del arreglo conceptual de las obras, planos particulares del arreglo conceptual de las obras, y el catálogo, programa de ejecución del proyecto (CONAGUA, 2019).

2.2. Diseño y elaboración de los talleres participativos con autoridades de los diferentes niveles de gobierno y población civil

El objetivo de los talleres se enfoca en la integración y participación comunitaria para la construcción de conocimiento compartido y buenas prácticas. En este ejercicio se propone llevar a cabo la inclusión de personas de la comunidad, de agentes gubernamentales, estatales y federales, con el propósito de homologar el entendimiento respecto a conceptos básicos, así como, cimentar las bases del proyecto. De forma particular, se trata de una capacitación y repaso general acerca de los conceptos técnicos, de las acciones y operación. En este ejercicio también se busca el planteamiento de las problemáticas desde la visión de la población desde una postura donde se compartan propuestas de solución.

3. Resultados

3.1. Talleres comunitarios de participación ciudadana del proyecto de micro pesas

Se obtuvo la propuesta de la estructura de los talleres, esta se formó por una serie de fases que se describen en la tabla 1.

Tabla 1. Fases del proceso colaborativo.

Fase I Diagnóstico	Fase II. Definición transversal	Fase III Resultados y conclusiones
Sesión grupal con la participación de los gobiernos nacional, estatal, y municipal. En esta fase se explican las generalidades del proyecto y los conceptos importantes. El objetivo principal es la homologación de conocimientos. En un segundo momento la mesa de trabajo analizó la caracterización de la zona de estudio para señalar las problemáticas y las posibles zonas de instalación, para ser puntualizadas en la cartografía y obtener un mapa de sitios óptimos, en conceso.	Sesión grupal con representatividad de los gobiernos estatales y de diferentes sectores de la población civil. Los talleres iniciaron con una sesión grupal en la que se explicaron las generalidades de la sesión, el concepto de buenas prácticas y la importancia del trabajo colaborativo. El objetivo es captar las aportaciones de la población en cuanto a ideas y saberes, para complementar la asignación de los puntos de instalación de las micro-presas.	Los talleres iniciaron con una sesión grupal en la que se explica las zonas propuestas y la percepción de la población acerca del proceso técnico y participativo; visión, objetivos y ejes del proyecto. En esta fase también se lleva a cabo una concientización sobre la importancia del trabajo colectivo, el involucramiento de todas y todos los actores, así como la creación de compromisos y asignación de responsabilidades; se realiza el cierre de actividades con diversos actores clave y se presentan las siguientes actividades del proyecto.

Fuente: elaboración propia.

3.2. Sistema de presas en microcuencas

Como resultados se presenta el prototipo de escalabilidad de una planta sustentable de captación de agua, con los anexos referentes a:

1. Recomendaciones para la preparación del terreno, que indica despejar las áreas mediante la limpieza del sitio de construcción, eliminando vegetación y materiales sueltos, la excavación necesaria para alcanzar una base sólida que soporte la estructura de la presa.
2. Diseño del sistema en planta en el que se describe de forma gráfica desde una vista aérea de una microcuenca y su sistema de las presas de gavión (Figura 1), presas de construcción híbridas, su área de captación, así como las tuberías y la distribución a la comunidad aguas abajo.

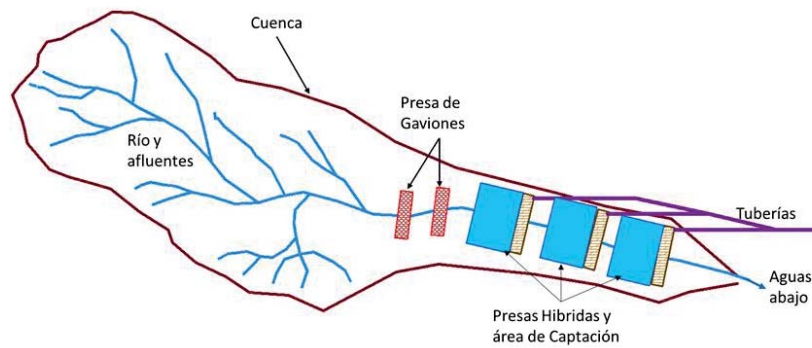


Figura 1. Modelo en planta del sistema de presas.

Fuente: elaboración propia.

3. Croquis de la primera y segunda presas de gavión (Figura 2), en vista de frente y de perfil, la cual, se utilizarán para amortiguar la fuerza de la caída del agua que de acuerdo con la pendiente puede aminorar los efectos de la velocidad. Posteriormente a pie de la estructura permitirá la infiltración y fungirá como nivel muerto para los sedimentos. Estas dos presas tienen la finalidad de detener la mayor cantidad de sedimentos en suspensión, así como de arrastre de fondo, contarán con una malla en la pared interna, para detener sedimentos grandes, medianos, así como los escalones malla para sedimentos pequeños.

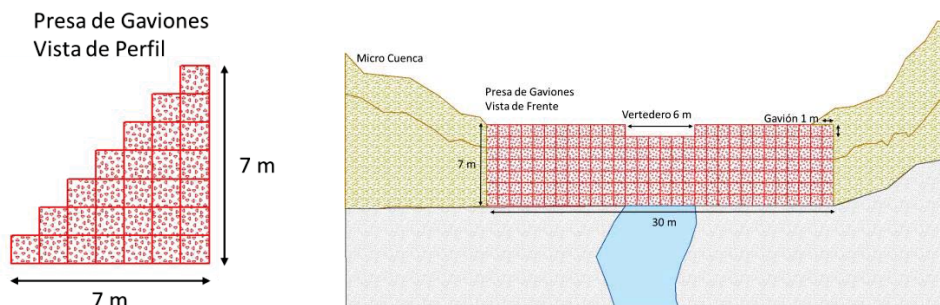


Figura 2. Presas de Gavión.

Fuente: elaboración propia.

4. Presas de la tercera a la quinta en método de construcción híbrido (Figura 3). Estas presas deben tener estructuras hidráulicas para el control de cauces, además de proveer seguridad estructural y resistencia contra el agrietamiento y/o la rotura del macizo. Por ser considerada una estructura monolítica, esta debe ser muy estable, para evitar algún deslizamiento por carga externa, debido a su propio peso. La propuesta incluye la instalación de un tanque amortiguador que ayude a disipar la energía de caída del agua, aminorando los efectos de socavación al pie de las presas. Se debe construir en la base de las presas, de 1 a 2 túneles, donde se colocarán rejillas para limpiar el agua de sedimentos y basura, antes de dirigir el agua a tanques de almacenamiento donde se limpiará el agua. En su parte baja se construirán los cimientos y anclajes necesarios para esta obra. Además, en la parte inferior (derecha o izquierda) se construirá un desagüe que tiene 3 rejillas para filtración de sedimentos grandes, medianos y/o basura. Así como la construcción de un canal sedimentador para limpieza de las presas.

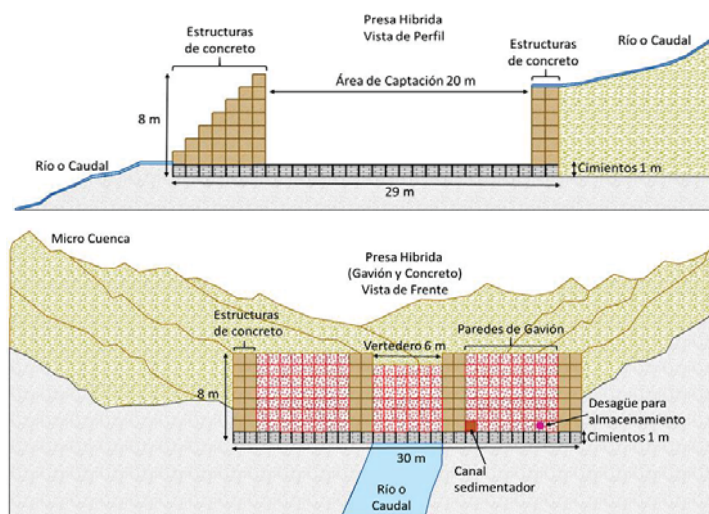


Figura 3. Perfil y frente de las presas con el método de construcción híbrido.

Fuente: elaboración propia.

5. Área de captación de agua, en vista de frente (Figura 4), la cual, tendrá una distancia de 30 metros en la parte superior y de 26 metros en su parte más baja, dejando 2 metros de pendiente en cada lado para la construcción de apoyo estructural. La vista de perfil muestra una distancia de 20 metros en la parte superior y 16 metros en su parte más baja, dejando 2 metros de pendiente en cada lado para la construcción de apoyo estructural. Lo anterior, estará recubierto por una geomembrana de polietileno de alta densidad, como barrera impermeable diseñada para evitar filtraciones de agua por la estructura, los canales o se infiltre en el subsuelo.

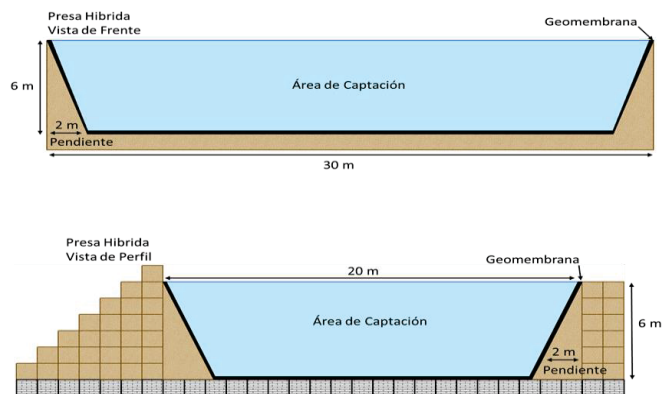


Figura 4. Área de captación de agua, en vista de frente.

Fuente: elaboración propia.

6. Roto Filtro (una unidad) fabricado con material de construcción en acero inoxidable AISI 304, malla Johnson de 1 mm de separación, caudal proporcionado 736 LPM, diámetro del cilindro 400 mm, longitud del cilindro 490 mm, diámetro de entrada 6", diámetro de salida 8", motor eléctrico de 0.25 HP (Figura 5).



Figura 5. Sistema de Roto Filtro.

Fuente: Water (2026), Sistemas de tratamiento de aguas grises.

Instalación de Sistemas Hidráulicos en la planta de tratamiento y el tanque de almacenamiento de biorreactores para limpieza biológica del agua, vertederos y drenajes: Instalar sistemas que manejen el flujo del agua durante crecidas y permitan el desagüe controlado del embalse, es crucial para la seguridad estructural del sistema (Figura 6).

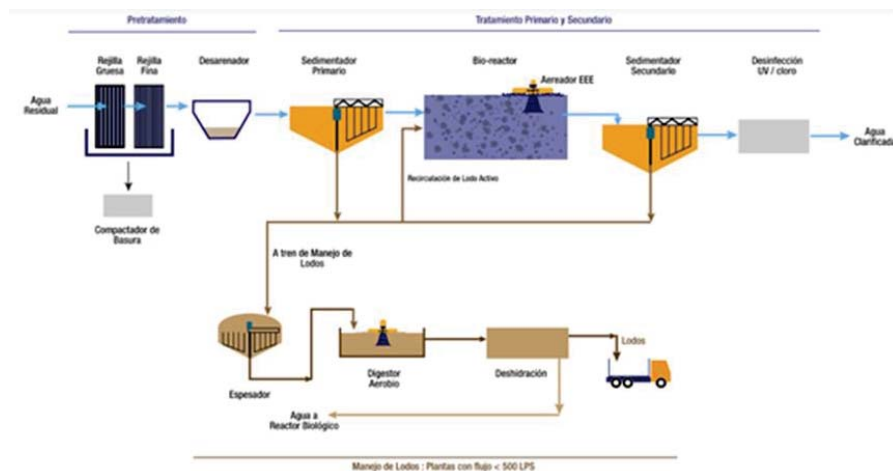


Figura 6. Descripción grafica de los tanques de almacenamiento y manejo de lodos.

Fuente: SEPTAR, s.f.

7. Diagrama del tanque metálico de almacenamiento de agua, cilíndrico vertical atmosférico para almacenar 1,060,000 litros de agua, compuesto de placa de acero galvanizada atornillada con liner interno de 1.1 mm. Cumple con la norma de agua

potable NSF, con un tiempo de vida de 20 años. Incluye escalera y boquillas (Figura 7).

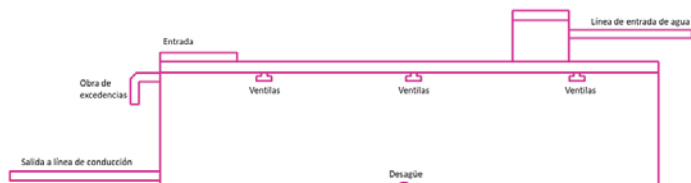


Figura 7. Diagrama del tanque metálico de almacenamiento de agua.

Fuente: elaboración propia.

8. Tubería metálica y de PVC de alto rendimiento para conducción y distribución de agua (Figura 8).



Figura 8. Tubería metálica y de PVC.

Fuente: elaboración propia.

9. Cuarto rompedor de presión para disminuir la velocidad del agua y así poder distribuirla a través de la infraestructura de tomas municipales (Figura 9).

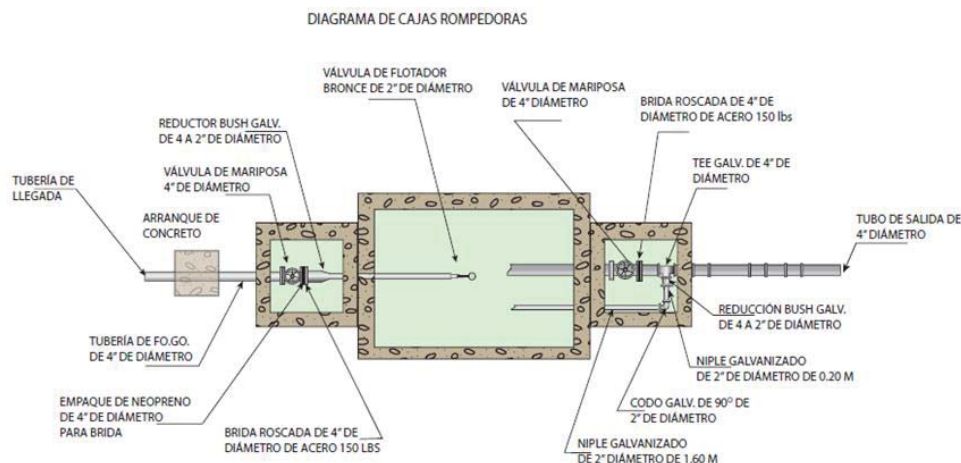


Figura 9. Cuarto rompedor de presión.

Fuente: Imagen tomada de internet sin autor.

10. Vista aérea del esquema del sistema de las presas de gavión, presas de construcción híbridas, su área de captación, así como las tuberías para llevar el líquido al área de cribas en el tanque de almacenamiento; posteriormente mediante tuberías y por gravedad se enviará a una caja rompedora de presión para poder conectarse y distribuir a la comunidad aguas abajo (Figura 10).

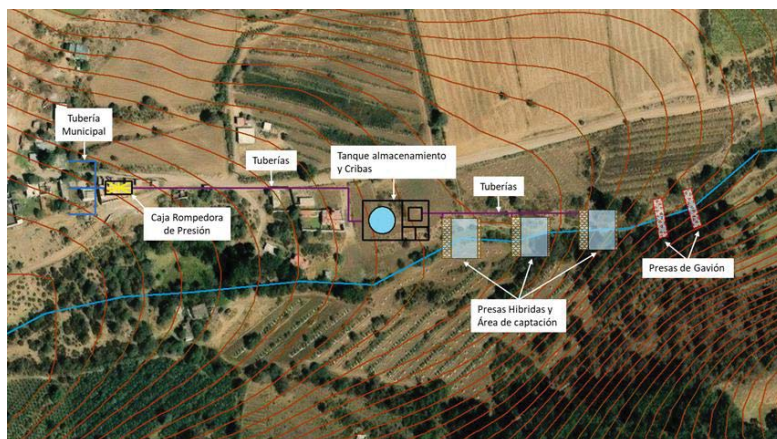


Figura 10. Vista aérea del esquema del sistema de las presas de gavión.

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, en cuanto a los alcances esperados de los beneficios territoriales de las micro presas se enmarcan en la siguiente lista:

1. Almacenamiento, suministro y distribución del agua de lluvia por gravedad en las comunidades urbanas y rurales que se localicen aguas abajo del sistema de presas, se estima un alcance de tres colonias o de una población de 10,000 habitantes, contribuyendo a la salud pública y el bienestar de la población en general.
2. Control de caudales para evitar inundaciones, encharcamientos o desastres en la comunidad aguas abajo de la presa. Al regular el flujo del agua, las presas pueden proteger a las poblaciones aguas abajo de inundaciones, lo que es especialmente importante en áreas propensas a desastres por estos fenómenos naturales.
3. Infiltración del excedente de agua a los mantos freáticos con recargas de acuíferos por embalses para contribuir a la no sobreexplotación del vital líquido en un periodo de 5 a 7 meses al año.
4. Disminución en extracción de agua del subsuelo por 5 o 7 meses y al mismo tiempo evitar bombearla hacia arriba y después distribuirla aguas abajo.

5. Mejorar la infraestructura hidráulica y promover un desarrollo comunitario más equitativo e inclusivo en las comunidades locales, asegurando que el agua se distribuya en los sectores de la población que más la necesiten.

6. Generar una base de datos de los regímenes de lluvia en asociación con el estado, identificando temporadas de huracanes que propicien lluvias abundantes y puedan desencadenar desastres a nivel nacional, con base en esto desarrollar escenarios de captación de lluvias.

7. Disminuir y prevenir el impacto ambiental desde la óptica por una situación de arranque determinada, para establecer diferentes efectos que se generan por la instalación de las presas, como puede ser la retención de sólidos producto de la erosión producida aguas arriba, la regeneración de nuevas especies en los hábitats originados, la distribución regulada de los nutrientes suspendidos en las corrientes de agua, la mejora paisajística, por la aparición de lámina de agua, la regulación climática en cuanto a la frecuencia y tipo de lluvias.

Como se puede observar la intención de los talleres se enfoca en tres puntos relevantes: 1) socializar la información a los actores clave, 2) capacitar sobre conceptos y cuestiones técnicas, y 3) La toma de decisiones y responsabilidades de forma colaborativa

4. Discusión

De acuerdo con el objetivo del proyecto, el diseño de una propuesta como es el sistema de captación de aguas en microcuencas proporciona una alternativa bajo un enfoque sustentable, económico y eficiente, que impulsa modelos de autogestión del recurso agua en el que se integra la visión comunitaria.

Este proyecto de investigación científica e innovación tecnológica toma como fundamento el concepto de cosecha de agua (captación, almacenamiento y posterior distribución por gravedad a las comunidades que se ubiquen tanto en zonas de montaña como aguas abajo). A partir de esto, se formula la idea de lograr beneficios desde una visión sustentable y

ambientalmente responsable, de la participación comunitaria y de la equidad en cuanto a la distribución del líquido a un bajo costo. El modelo permite concretar un suministro aproximado de tres colonias o una población aproximada de 10,000 personas por Micro presa, así como, la disminución del costo actual del recurso; actualmente su costo promedio es de \$85 pesos por metro cubico en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca y con el sistema se calcula tener un precio de \$1.36 a \$2.00 pesos por metro cubico, esto beneficiaría a las comunidades tanto urbanas como rurales asentadas en zonas de difícil acceso (cerros, laderas medias, altas, o en barrancas) y bajo o nulo suministro de agua de calidad.

Complementando el punto anterior, el proyecto contribuye a dar una alternativa de solución en cuanto a el control de caudales lo que reduciría el número de inundaciones, encharcamientos y/o desastres en las comunidades aguas abajo. Por último, y no menos importante, es lograr infiltrar el excedente de agua a los mantos freáticos para ayudar a recargar los acuíferos a través de embalses para disminuir la sobreexplotación del líquido esencial en un periodo de 5 a 7 meses al año.

5. Conclusiones

La propuesta de presas sustentables de captación de agua de lluvia almacenamiento y distribución por gravedad plantea:

- a) Ahorro de energía de bombeo de agua a zonas altas.
- b) Evitar la sobreexplotación de pozos de agua y afectación en el nivel freático.
- c) Impulsar un manejo integrado de cuencas para reducir la erosión, evitando fuentes de contaminación puntual y difusas, modificando los procesos de erosión y su respectiva área de sedimentación.
- d) Apoya a la prevención de riegos por inundación en zonas de planicie y a la recarga de agua del subsuelo.

- e) Por ser estructuras de presas pequeñas, no representa la destrucción de los procesos vitales de los ríos.
- f) La reducción de los costos del agua, al capturar el agua de lluvia en partes altas de las microcuencas amortiguando los gastos de traslado, de bombeo y re-bombeo, cada metro cúbico de agua.
- g) Aplicación de la gobernanza por medio de la interacción de la población civil en las decisiones de gestión del agua por medio de un consejo comunitario.

Como se puede observar la gestión de los recursos hidráulicos, así como, de las problemáticas de riesgo de inundación o sequías, requieren ser abordados desde una visión integral, entre los que se incluyen como alternativa económica y eficaz la construcción de embalses y presas, en el que sus beneficios tangibles a la población se enfocan al abastecimiento de agua a poblaciones, y mejoras medioambientales, turismo y demás actividades.

6. Agradecimientos

Agradecemos a la Empresa Idea Geomática S.A. de C.V.

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

Anand, M., Naik, M. K., Ramegowda, G., & Rani, G. D. (2010). Biocontrol and plant growth promotion activity of indigenous isolates of *Pseudomonas fluorescens*. Consultado: s11032-010-9397-1.pdf

- Angeles-Serrano, G., Perevochtchikova, M., & Carrillo-Rivera, J. J. (2008). Posibles controles hidrogeológicos de impacto ambiental por la extracción de agua subterránea en Xochimilco, México. *Journal of Latin American Geography*, 39-56.
- Aboites Aguilar L., 2012. Aventuras con el agua. La administración del agua de riego: historia y teoría. Texcoco, Colegio de Posgraduados. Región y sociedad vol.24 spe 3 Hermosillo. 437 pp.
- Bernardino, L. T. (2017). La gestión del agua potable en la Ciudad de México: los retos hídricos de la CDMX: gobernanza y sustentabilidad.
- Cabral, J. J. V., Medina, I. O., & Ortiz, M. H. (2024). Hacia una gestión sostenible del agua en México: Innovación agroecológica y gobernanza policéntrica. *Scientia et PRAXIS*, 4(8), 1-31.
- Castro, Carlos Geovanny Delgado. "Efectividad de la colaboración intersectorial en la gestión sostenible del recurso hídrico: un análisis sistemático." *Mikarimin. Revista Científica Multidisciplinaria* 11.2 (2025): 5-31.
- Comisión Nacional del Agua. (2019, febrero 27). Permiso para realizar obras de infraestructura hidráulica en cauces y zonas federales. Gobierno de México. Consultado en: <https://www.gob.mx/conagua/es/documentos/permiso-para-realizar-obras-de-infraestructura-hidraulica?idiom=es>
- Dourojeanni, A., Jouravlev, A., & Chávez, G. (2002). Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica.
- Domínguez, J. (2019). La construcción de presas en México. Evolución, situación actual y nuevos enfoques para dar viabilidad a la infraestructura hídrica. *Gestión y política pública*, 28(1), 3-37.
- Fedoseev, P. (1978). Lo social y lo biológico en filosofía y sociología. *Ciencias Sociales*, (33).

- Chávez Durán, Á. A., Flores López, H. E., Mora Orozco, C. D. L., Ruíz Corral, J. A., Ramírez Ojeda, G., & Rubio Camacho, E. (2014). Sensibilidad de zonas bioclimáticas de México frente al cambio climático. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(SPE10), 2021-2033. Consultado: 2007-0934-remexca-5-spe10-2021.pdf
- Instituto Mexicano para la Competitividad. (2023). *Aguas en México, ¿escasez o mala gestión?* IMCO. <https://agua.org.mx/biblioteca/aguas-en-mexico-escasez-o-mala-gestion-imco/>
- León-Escobedo, D. D. (2024). Retrofit of seismic damage on a school building based on risk/benefit analysis. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 25(1). Consultado en: León-Escobedo, D. D. (2024). Retrofit of seismic damage on a school building based on risk/benefit analysis. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 25(1).
- LEY DE AGUAS NACIONALES. Última Reforma DOF 08-05-2023. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Secretaría General y Secretaría de Servicios Parlamentarios. 118 pp.
- Pedrozo Acuña, A. (2021). La sobreexplotación de acuíferos: camino seguro hacia la quiebra hídrica.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, 2020). Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2020: agua y cambio climático. Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos. Consultado: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373611>
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, 2021). Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo 2021: valorar el agua. Consultado el 21-Nov-2024, de: <https://www.unesco.org/reports/wwdr/2021/en/download-report>

- Ostrom, E. (2014). Más allá de los mercados y los Estados: gobernanza policéntrica de sistemas económicos complejos. *Revista mexicana de sociología*, 76, 15-70.
<http://132.248.234.52/index.php/v76sup/158-v76sup-a2pt2>
- San Juan Flores, P. (2025, septiembre 21). La cara buena de los diluvios: el sistema Cutzamala del que bebe Ciudad de México deja seis años de sequía y roza su máximo histórico. *El País*. <https://elpais.com/mexico/2025-09-21/la-cara-buena-de-los-diluvios-el-sistema-cutzamala-del-que-bebe-ciudad-de-mexico-deja-seis-anos-de-sequia-y-roza-su-maximo-historico.html>
- SEPTAR. (s.f.). [Imagen de infraestructura hidráulica en México] [Fotografía]. SEPTAR.
<https://septar.com.mx>
- Serre, J. P. (2002). *Trees*. Springer Science & Business Media.
- Vázquez Contreras, A., Dávila Serrano, M., Acosta Quevedo, R., & Sánchez Pérez, J. (s.f.). La importancia de la exploración geológica y geofísica en los costos de construcción de presas hidroeléctricas. Ejemplos comparativos en México. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica*.
- Wen, J. (2024). Diseño de un biorreactor de membranas para el tratamiento del agua residual del campus de Vera de la Universitat Politècnica de València (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- Wezel, A., Gemmill Herren, B., Bezner Kerr, R., Barrios, E., Rodrigues Gonçalves, A., y Sinclair, F. (2020). Agroecological principles and elements and their implications for transitioning to sustainable food systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 40. doi: <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00646-z>
- Water. (s.f.). *Sistemas de tratamiento de aguas grises*. Water. Recuperado el 26 de enero de 2026, consultado en: <https://maswater.com.mx/division-de-agua/sistemas-de-tratamiento-de-aguas-grises/>

Comparación de métodos de relevamiento topográfico para el diseño de trabajo de campo con RPA/drone

Comparison of Topographic Survey Methods for Fieldwork Design Using Drones

Sonia Laura Lanzelotti^{1,2,3*}, Federico Nicolás Chait^{1,2}, Eloy José Montes Galbán³, Noelia Cecilia Principi³ y Marcelo Alejandro Lamamí¹

¹ Instituto de las Culturas, Universidad de Buenos Aires y Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Bartolomé Mitre 1970 5to A, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina, C.P. 1039. sonia.lanzelotti@conicet.gov.ar, marcelo5144@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3617-9466>, <https://orcid.org/0009-0008-8570-7350>

² Departamento de Ciencias Antropológicas, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires, Puan 480, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina, C.P. 1406. federico.chait@uba.ar, <https://orcid.org/0009-0001-1563-9929>

³ Instituto de Investigaciones Geográficas, Departamento de Ciencias Sociales, Universidad Nacional de Luján, Ruta Nacional 5 y Av. Constitución, Luján, Provincia de Buenos Aires, Argentina, C.P. 6700. emontesgalban@conicet.gov.ar, nprincipi@unlu.edu.ar, <https://orcid.org/0000-0002-4075-4873>, <https://orcid.org/0000-0002-8819-6743>

*Autor(a) de Correspondencia

Recibido: 24/09/2025. Aceptado: 20/12/2025. Publicado: 05/02/2026.

Cómo citar este artículo: Lanzelotti, S. L., Chait, F. N., Montes Galbán, E., Principi, N. C. y Lamamí, M. A. (2026). Comparación de métodos de relevamiento topográfico para el diseño de trabajo de campo con RPA/drone. *Geografía Aplicada*, 2(1), 50-74.

Resumen

En este artículo se compara la exactitud y la precisión que se obtiene en productos topográficos elaborados a partir de imágenes capturadas mediante RPA/drone, utilizando distintas metodologías de relevamiento. Estas son: colocación de puntos de apoyo fotogramétricos (PAF) en distinta cantidad y forma de distribución, diferente instrumental utilizado para la medición (GPS navegador, nivel óptico, estación total), y registro de imágenes a diferentes alturas de vuelo. Se elaboraron Modelos Digitales de Elevación (MDE) y ortofoto para cada una de las estrategias de relevamiento y se calcularon cuatro parámetros estadísticos de error. Se observa que la incorporación de 5 a 7 PAF es suficiente para las aplicaciones a escalas 1:500. A partir de 8 PAF se obtienen productos útiles para todas las escalas de representación cartográfica; la altura de vuelo impacta poco sobre la precisión del MDE, pero afecta la identificación de formas en la ortofoto; la exactitud geodésica medida con estación total o con nivel óptico escalado con medidas de distancia arroja resultados disímiles, aunque la precisión en ambos casos muestra una fuerte coherencia al interior de los modelados. Los resultados son de utilidad en el diseño de relevamientos para aplicaciones en producción agropecuaria, arqueología, biología, geografía y ordenamiento territorial.

Palabras clave: Relevamiento topográfico, RPA/drone, Exactitud y precisión, Fotogrametría, Modelos de Elevación Digital, Planificación de trabajo de campo.

Abstract

This article aims to compare the accuracy and precision of topographic products generated from drone/RPA imagery, using different survey methodologies: varying the number and

distribution of photogrammetric control points (PAF), the measurement instruments used (handheld GPS, optical level, total station), and image capture at different flight altitudes. Digital Elevation Models (DEM) and orthophotos were produced for each survey strategy, and four statistical error parameters were calculated. Results show that using 5 to 7 PAFs is sufficient for applications at scales of 1:500 and larger, while 8 or more PAFs yield products suitable for all cartographic representation scales. Flight altitude has little impact on DEM precision but does affect the identification of features in orthophotos. Geodetic accuracy measured with total stations or with optical levels scaled using distance measurements shows variability, although the internal precision of the models remains consistent in both cases. These results are useful in designing survey strategies for applications in agriculture, archaeology, biology, geography, and land-use planning.

Keywords: Topographic Survey, UAV, Accuracy and Precision, Photogrammetry, Digital Elevation Models (DEMs), Fieldwork Planning.

1. Introducción

Las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) ofrecen formas de acceder y conceptualizar la realidad geográfica mediatizada por la informática, sustentadas por un Paradigma Geotecnológico que ha generado un gran impacto en la Geografía y también en otras ciencias que toman como hilo conductor el enfoque espacial (Buzai, 1999). Las Geotecnologías refieren a un conjunto de conocimientos técnicos, con sustento científico, para manejar información geográfica, asociada a coordenadas, y que pueden ser aplicables a diferentes campos disciplinarios, a partir de hardware, software y técnicas que soportan funciones de obtención, procesamiento, visualización y difusión de dicha información (Moreno, 2013). En los últimos años, el desarrollo y popularización de las geotecnologías a partir del uso de los drones o RPAs (Aeronaves Pilotadas Remotamente, del inglés, *Remotely Piloted Aircraft*), ha expuesto la posibilidad de tomar y poner a disposición fotografías aéreas a baja altura y de gran calidad desde el punto visual y métrico, con las cuales se

pueden generar, a partir de técnicas de restitución fotogramétrica, diversos productos digitales que son la base para la elaboración de planos, mapas y otras imágenes de interés para una gran diversidad de aplicaciones en diferentes campos de conocimiento y gestión de recursos naturales y culturales.

Entre las grandes ventajas de la utilización de RPA para el relevamiento planialtimétrico se pueden mencionar: la reducción de costos en términos de tiempo, trabajo y cantidad de operadores, la posibilidad de explorar áreas peligrosas o inaccesibles, y que permite el registro sin invadir ni destruir los recursos naturales/culturales ni su entorno (Domínguez y Martínez, 2019). Sin embargo, es importante notar que la información capturada mediante RPAs requiere validaciones y calibración local bajo condiciones de campo para ser consideradas de alta precisión (Jiménez-Jiménez et al., 2017).

Los Modelos Digitales de Elevación (MDE) elaborados por fotogrametría a partir de imágenes tomadas con drones pueden variar notablemente en su precisión y exactitud, y contener errores, ya sea sistemáticos o accidentales, que ocurren desde la planificación del vuelo hasta el procesamiento de las imágenes. De acuerdo con Jiménez-Jiménez et al. (2017), entre los errores sistemáticos se encuentran: la precisión que brinda el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) con el que se obtienen las coordenadas, a la sensibilidad del RPA al viento, a la capacidad de pilotaje autónomo del RPA y/o la calidad baja de sus sensores (que afectan aleatoriamente la altitud y ubicación en el vuelo), al tipo de RPA seleccionado (los multirrotores son más estables que los de ala fija) y a la precisión geométrica de la cámara provocada por la distorsión del objetivo. Por otro lado, y de acuerdo a los mismos autores, los errores accidentales pueden deberse a la falta de calibración de los parámetros internos de la cámara, al porcentaje bajo de traslape entre imágenes (< 70 %), al enfoque de la cámara en el vuelo (ya que puede que no se mantenga fijo, lo que hace que la distancia focal varíe), al número de puntos de control seleccionados y a su distribución en el terreno, y a la deficiente identificación de los puntos de control en las imágenes dentro del programa de restitución fotogramétrica.

Por otro lado, Novara y Jacamo (2020) realizaron un estudio para determinar altura de vuelo óptima para elaboración de MDE de entornos naturales (geoformas) y construidos (infraestructura), sin la utilización de PAF. Así, advirtieron que a partir de una altura de vuelo de 60 m AGL, se va degradando paulatinamente la delimitación de los bordes de las estructuras edilicias haciendo difícil su identificación y aumentando impresión de las mediciones que resultan cada vez mayores no solo frente a la verdad del terreno (precisión absoluta), sino también respecto a los demás elementos mensurados al interior de los modelados (precisión relativa). Por otro lado, Santecchia et al. (2023) propusieron que para mejorar la exactitud en el valor de la altura de los MDE generados a partir de imágenes tomadas con RPA se deben colocar PAF en terreno, pero también sobre las edificaciones, en vista de lograr un catastro 3D confiable.

Recientemente, Lanzelotti et al. (2025) puntualizaron que las imágenes de sitios arqueológicos relevados con RPA suelen mostrar con gran detalle las características del sustrato, la vegetación, los muros y hasta los mampuestos que componen los distintos tipos de estructuras arqueológicas, sin embargo, la calidad visual de los productos no guarda relación directa con su precisión fotogramétrica. A partir de una investigación experimental sobre un sitio arqueológico de 58 hectáreas, los autores cuantificaron los umbrales de exactitud de los productos cartográficos según la cantidad y distribución de Puntos de Apoyo Fotogramétricos (PAF) para lograr la utilidad tanto de la ortofoto como del MDE y sus productos derivados (curvas de nivel, pendiente, sombreado, orientación, curvatura, etc.).

Por otro lado, Reche (2024) ha señalado que la definición de precisión y exactitud de un MDE dependerá de los propósitos de su utilización. Por ejemplo, las escalas cartográficas comúnmente empleadas en el diseño de sistemas de terrazas agrícolas, van desde 1:2000 a 1:5000, pudiendo ser, ocasionalmente, mayores (1:500 o 1:1000) por lo que el autor propone la utilización de nivel óptico como equipamiento suficiente para el registro de PAF que garanticen la precisión del MDE esas escalas.

El presente trabajo tiene como objetivo principal generar información de base que permita comparar la exactitud y precisión obtenidas en productos topográficos elaborados a partir de imágenes capturadas mediante RPA, utilizando distintas metodologías de relevamiento de campo. Se pretende generar un insumo de utilidad para orientar la toma de decisiones metodológicas para futuros casos de aplicación de relevamientos topográficos de utilidad para gestión de recursos naturales y culturales, en áreas como la producción agropecuaria, la arqueología, la biología, la geografía física y el ordenamiento territorial.

2. Metodología

En los campos de la ciencia geográfica y la estadística, la exactitud de un sistema de medición representa el grado de acercamiento de las medidas de una cantidad al verdadero valor de esa cantidad. La precisión de un sistema de medición, se encuentra relacionado con la reproducibilidad y la repetibilidad; y se define como el grado en que la repetición de una medición en las mismas condiciones muestra los mismos resultados.

En este trabajo, la precisión y exactitud de los productos cartográficos se evaluaron tomando en consideración distintas metodologías de relevamiento de campo. Estas se definieron en base a:

- Colocación de distinta cantidad y forma de distribución de PAF.
- Medición de PAF con instrumentales diversos: GPS navegador, estación total (EETT), nivel óptico y cinta métrica.
- Relevamiento a distintas alturas de vuelo: 50 m y 100 m AGL (Arriba del Nivel del Suelo, del inglés, Above Ground Level).

El equipamiento utilizado para el trabajo de campo fue: una estación total Trimble 3506, un nivel óptico Pentax 30x, un GPS Navegador (GARMIN Etrex 30), un Drone DJI Phantom 4 con Tablet Samsung modelo SM-T595, y 15 Marcadores materializados con lonas impresas con diseño en cuadrantes blanco-rojo. El software utilizado para la planificación y realización de los vuelos fue Pix4D Capture. Para las restituciones fotogramétricas se utilizó Agisoft Metashape Professional versión 1.8.2, computadora con procesador (CPU) AMD Ryzen 7 5700G con Radeon Graphics, procesador gráfico (GPU) AMD Radeon(TM) Graphics (GFX90C) y NVIDIA GeForce RTX 3070, y 32 GB de memoria RAM.

2.1. Etapa de diseño

Los relevamientos se realizaron en el Campo Experimental del Centro de Investigación Docencia y Extensión en Producción Agropecuaria (CIDEPA) de la Universidad Nacional de Luján, que se ubica en el sector noreste de la provincia de Buenos Aires, Argentina (Figura 1). Allí se tomó un área de 18 hectáreas, en la cual se distribuyeron 15 Puntos de Control en el Terreno (PCT), para su utilización como PAF y como instancia de verificación de resultados.

Cabe destacar que la diferencia entre un PAF y un PCT radica que en los primeros se utilizan en el proceso de restitución fotogramétrica, en tanto que los PCT se utilizan para cuantificar las diferencias en la precisión entre los modelados y las mediciones realizadas directamente sobre el terreno. Estos puntos fueron localizados atendiendo a una lógica modular que permitieron generar doce diseños individuales de distribución de puntos que cubren los extremos y el centro del área a relevar, y distribuidos homogéneamente.

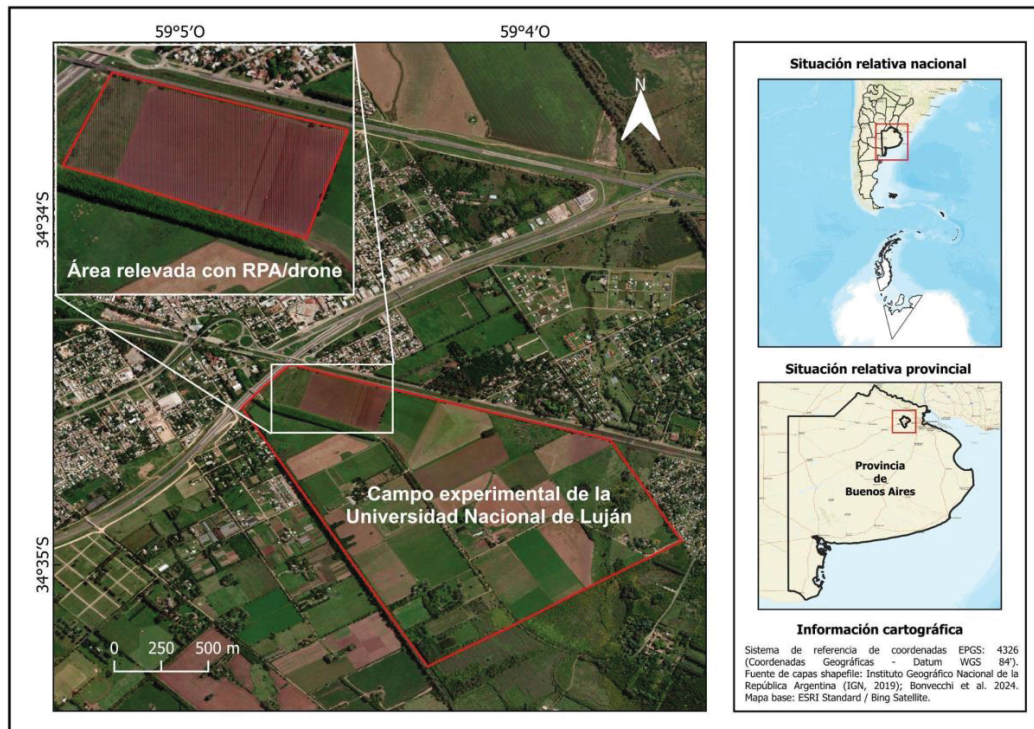


Figura 1. Ubicación del Campo Experimental del Centro de Investigación, Docencia y Extensión en Producción Agropecuaria (CIDEPA) de la Universidad Nacional de Luján, Argentina.

Fuente: elaboración de los autores en base a IGN (2019); Bonvecchi et al. (2024).

Estas localizaciones fueron establecidas en el software QGIS y luego cargadas en Navegadores GPS para su localización durante el trabajo de campo (Figura 2). Se observan dos tipos de Puntos: los “Marcadores” denominados de M1 a M12, y Estaciones de Relevamiento denominados A, B y C. Por otro lado se programaron los planes de vuelo utilizando la aplicación *PIX4D Capture* seleccionado la forma de grilla rectangular (*GRID MISSION*) del tipo 2D, y cubriendo una superficie mayor a la requerida para luego descartar el área de bordes. En base a los trabajos referidos en los antecedentes, se establecieron los siguientes parámetros:

Plan de vuelo 1: altura de vuelo 50 m AGL equivalente a un GSD (Distancia de muestreo del terreno, del inglés, Ground Sample Distance) teórico de 2,19 cm/píxel, un solapamiento de 75 % entre cámaras y un total de 2 vuelos (uno por cada batería disponible) de 11 y a 10 minutos de duración cada uno.

Plan de vuelo 2: altura de vuelo: 100 m AGL equivalente a un GSD teórico de 4,38 cm/píxel, un solapamiento de 75 % entre cámaras y una duración de 8 minutos.



Figura 2. A la izquierda: Diseño en gabinete de la distribución de marcadores (en números) y estaciones de relevamiento (en letras) sobre una imagen satelital (Google Satellite en QGIS) del área de trabajo. A la derecha: capturas de pantalla de las misiones de vuelo programado a 50 m AGL (arriba) y a 100 m AGL (abajo), en el Software: Pix4D Capture.

Fuente: elaboración de los autores.

2.2. Etapa de trabajo de campo

El trabajo de campo se organizó en tres bloques. Un primer bloque consistió en la distribución en el terreno de los 12 marcadores y las 3 estaciones de relevamiento (15 PCT en total). Estos PCT se materializaron en el campo como lonas impresas con un diseño de cuadrantes en blanco y rojo con la indicación de un número en color negro, de 75 cm de

lado. La ubicación inicial de los mismos se estableció en base a los datos previamente cargados en el GPS navegador, y se fijaron con estacas en el suelo para evitar su movimiento debido al viento principalmente (Figura 3).



Figura 3. Contexto y equipamiento utilizado para el relevamiento de campo. Arriba a la izquierda: estación total; arriba a la derecha: nivel óptico; abajo a la izquierda: marcador; abajo a la derecha: *homepoint* con el dron previo al despegue.

Fuente: elaboración de los autores.

Un segundo bloque consistió en el registro de los datos planialtimétricos de cada uno de los marcadores. En primer lugar, se registraron los datos de altitud utilizando el nivel óptico, que implicó la utilización de las estaciones de relevamiento A y el traslado progresivo a las

estaciones B y C. También se tomaron medidas de distancia, aunque teniendo en consideración que serían de poca utilidad en la instancia de control habida cuenta el error de medición estándar de distancias con este equipo, que ronde de 0,5 a 1m.

Luego, posicionados en la Estación de relevamiento A, se midieron todos los marcadores con la EETT. Los datos planialtimétricos de los puntos así medidos se constituyeron en el marco de comparación para todas las evaluaciones de precisión y exactitud que veremos más adelante.

Finalmente, el tercer bloque de actividades de campo consistió en la realización de los vuelos planificados a 50 m y a 100 m AGL. Culminados los vuelos se retiraron los marcadores que estaban distribuidos en el terreno.

2.3. Etapa de procesamiento de información

Las imágenes capturadas con el RPA se procesaron en gabinete. Se generaron, a partir de restitución fotogramétrica, pares conformados por un MDE y su correspondiente ortofoto. Las restituciones se realizaron, en primer lugar, variando la cantidad y distribución de PAF, generando productos sin PAF, luego con 4 PAF y aumentando progresivamente hasta 15 PAF. Los datos de las coordenadas planialtimétricas se tomaron de aquellas registradas con EETT por un lado, y con el nivel óptico, por otro lado. Asimismo, se generaron pares de MDE-ortofoto a partir de las misiones vuelos realizadas a distinta altura. El modelo de flujo empleado para la restitución se basó en el Manual de Usuario de Agisoft (2022) con los ajustes específicos establecidos en Lanzelotti et al. (2025). Los datos se exportaron a una única planilla de cálculo. En el caso de las restituciones realizadas con datos de nivel óptico, se agregó al modelo de flujo, la aplicación de medidas de distancia entre marcadores (segmentos M1-M10; B-M12; M7-M6 y M10-M11) para ajustar los modelos en las coordenadas XY, en tanto que la coordenada Z se tomó directamente del dato de altitud registrado con el equipo.

Los pares MDE-ortofoto se exportaron en formato GEOTIFF para continuar con el tratamiento en un SIG (se utilizó el software QGIS Versión 3.34.9). Para el trabajo con coordenadas cartesianas, las capas se reproyectaron al Sistema de Referencia POSGAR 2007 - Faja 5. Se establecieron las coordenadas de cada marcador y modelado, y se exportaron a una planilla de cálculo (Chait y Lanzelotti, 2025). Luego se calcularon los errores residuales para cada una de las coordenadas X, Y y Z de los marcadores (C_{cal} por “Coordenadas calculadas”) para cada modelo respecto de las coordenadas medidas en terreno con la estación total (denominadas C_{obs} por “Coordenadas observadas”). También se calcularon los errores residuales para el promedio de XYZ en cada marcador, medido como la raíz cuadrada de la suma de los errores residuales de cada eje al cuadrado ($= \sqrt{(X_{cal} - X_{obs})^2 + (Y_{cal} - Y_{obs})^2 + (Z_{cal} - Z_{obs})^2}$).

A partir de éstos, se establecieron cuatro parámetros estadísticos de error: el error medio (EM), la raíz del cuadrado medio del error (RCME), la desviación estándar de los errores (DEE) y el error absoluto máximo ($E_{máx}$), para cada uno de los ejes, y para el promedio XYZ (tomado de Jiménez-Jiménez et al. 2017). Y también se calcularon los errores planimétricos, medidos como la diferencia de distancias entre dos pares de marcadores medidos con EETT, y sus homólogos medidos en cada MDE generado por restitución (Figura 4).

$EM = \frac{\sum_i^n (C_{cal} - C_{obs})}{n} \quad (1)$
$RCME = \sqrt{\frac{\sum_i^n (C_{cal} - C_{obs})^2}{n}} \quad (2)$
$DEE = \sqrt{\frac{\sum_i^n [(C_{cal} - C_{obs}) - EM]^2}{n-1}} \quad (3)$
$E_{max} = \max C_{cal} - C_{obs} \quad (4)$

Figura 4. Fórmulas de las ecuaciones 1 a la 4 utilizadas para estimar la precisión de los modelos, dónde: C_{cal} = coordenadas extraídas de los MDE en los PCT homólogos y C_{obs} = coordenadas de los PCT medidos con la estación total.

Fuente: Tomado de Jiménez-Jiménez et al. (2017).

Cabe destacar que el EM indica errores sistemáticos positivos o negativos, la RCME ilustra la dispersión de la distribución de frecuencias de los residuales y es sensible a valores altos de error, la DEE brinda información sobre la distribución de los residuales alrededor de la media y el $E_{\text{máx}}$ describe el residual de mayor magnitud en los datos (Jiménez-Jiménez et al. 2017). Asimismo, la DEE es también un indicador del error global y su valor indica que, asumiendo una distribución normal de los errores, el 68.27 % de los mismos se encuentran por debajo de la DEE indicada, 95.45 % por debajo de dos veces la DEE y 99.76 % por debajo de tres veces la DEE.

3. Resultados

3.1. Cantidad y distribución de puntos de apoyo fotogramétricos

Con la misión de vuelo efectuada a 50 ms AGL se obtuvieron 402 fotogramas que cubrieron una superficie de 19,3 hectáreas. Se produjeron 12 pares MDE-ortofoto con PAF cuya georreferenciación estuvo dada por los datos de la EETT, y 1 par MDE-ortofoto cuya georreferenciación estuvo dada por los datos del GPS navegador incluido en el RPA (denominado “sin PAF”). Se utilizaron los sufijos “a”, “b” para diferenciar distribuciones diferentes según una misma cantidad de PAF considerados. Todos los pares alcanzaron una resolución espacial en el MDE de 7,86 cm/pix, y en la ortofoto de 1.97 cm/pix, coherente con los datos de configuración del plan de vuelo (Figura 5).

Los diseños de cantidad y distribución de Marcadores para cada uno de los 12 pares de restituciones se ilustran en la figura 5. La tabla 1 muestra los parámetros estadísticos obtenidos para los ejes X, Y y Z y el promedio de todos ellos.

Se observa así que en el MDE elaborado sin PAF, el EM es de 14.250 cm (142 m), y que con 4 PAF se obtienen resultados que pueden ser de 1.420 cm (14 metros) o del 21 cm de acuerdo a la forma de distribución de los marcadores. La forma de distribución que más se ajusta al terreno es la que contempla tres extremos y el centro del área relevada (modelado

4 PAF-b). A partir de la utilización de 5 PAF los resultados se ajustan progresivamente con una meseta en los resultados a partir de 8 y 9 PAF. En este último, el EM promedio alcanza valores muy cercanos al máximo obtenido. La mayor precisión corresponde al modelado con 15 PAF, donde el EM promedio se reduce a 5 cm. Este valor se descompone en 0,4 cm en el eje X, -0.8 en el eje Y, y 0,7 cm en el eje Z (Figuras 5 y 6).

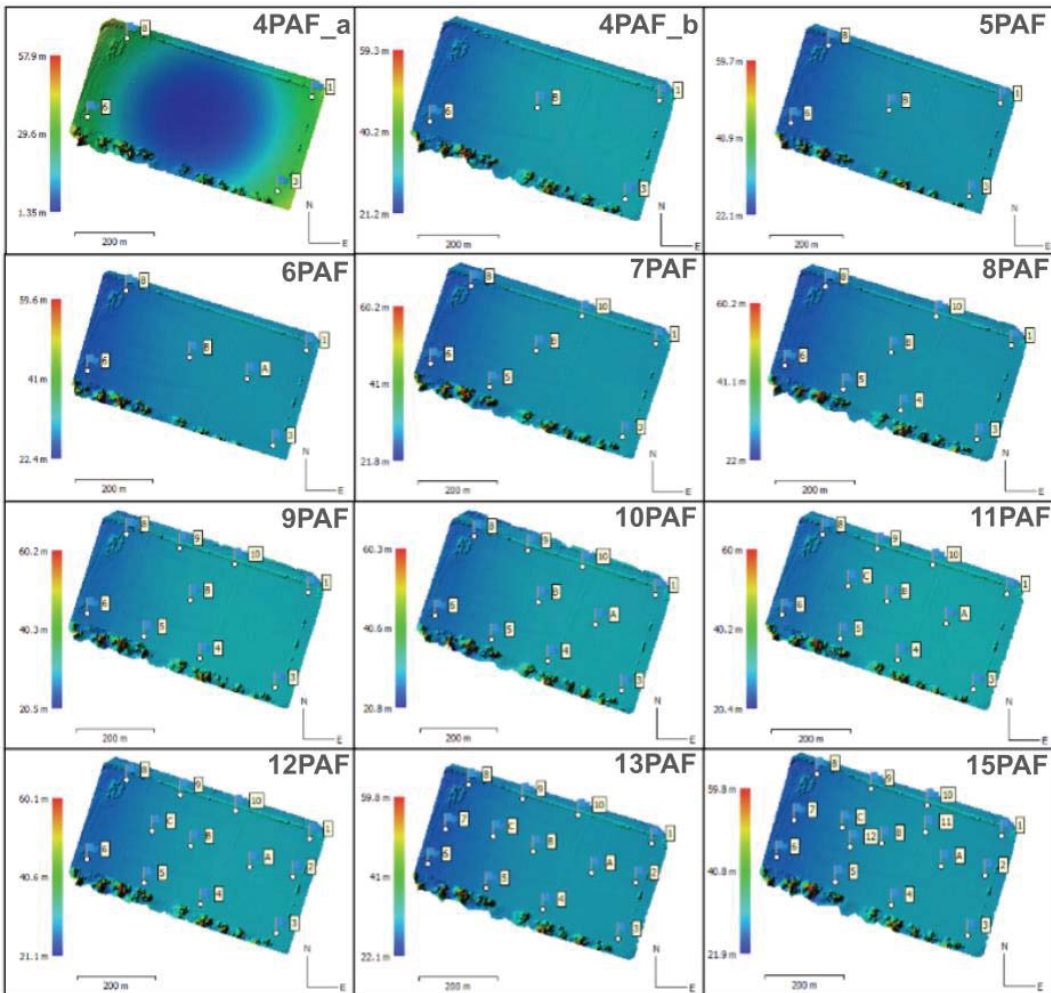


Figura 5. Restituciones fotogramétricas mostrando cantidad y distribución de los marcadores utilizados en cada uno.

Fuente: elaboración de los autores.

Tabla 1. Errores estadísticos (EM, RCME, DEE, E_{máx}) de cada una de las restitutiones fotogramétricas realizadas a partir de EETT, en los planos X, Y, Z, y promedio general XYZ.

Eje	Medidas (cm)	sin PAF	4 PAF_a	4 PAF_b	5 PAF	6 PAF	7 PAF	8 PAF	9 PAF	10 PAF	11 PAF	12 PAF	13 PAF	15 PAF
X	EM	96,3	-1,7	-8,4	-5,8	-7,3	-2,7	-1,1	1	-0,2	0,3	0,2	0,1	0,4
	RCME	160,1	57,9	12,8	10	11,2	6,2	5	3,7	3,9	3,7	3,5	3,9	3,3
	DEE	132,4	59,9	10	8,4	8,7	5,8	5,1	3,6	4	3,8	3,6	4	3,4
	E _{máx}	333,9	107,3	28,3	23,4	23,1	16,1	14,2	9	8,4	8,5	7,8	7,8	7,2
Y	EM	-64,8	2,6	1,6	-2,4	-3,8	-1,4	0,7	-2,2	-2,1	-0,7	-0,2	-0,6	-0,8
	RCME	104,5	44,7	16,6	12,1	10,7	8,2	6,6	6,4	6,1	5,5	4,9	4,9	4,4
	DEE	84,8	46,2	17,1	12,3	10,4	8,4	6,8	6,3	5,9	5,7	5	5,1	4,5
	E _{máx}	184,2	107,2	31	23,2	23	18,3	15,9	14,3	14,4	12,6	11,6	11,8	9,6
Z	EM	-14249,5	-1417,4	-8,6	-4,6	-3,5	-2,7	-0,3	-0,7	0,4	1,1	0,6	0,7	0,7
	RCME	14249,6	1761,7	16,9	13,9	14,1	8,7	3,3	2,8	3,3	3	2,5	1,7	1,8
	DEE	51,6	1083	15	13,5	14,1	8,5	3,4	2,8	3,3	2,8	2,5	1,6	1,7
	E _{máx}	14337,8	2792,2	38,4	42,3	41,2	31,2	8,2	9,7	8,5	7,9	7,1	3,7	3,9
Promedio XYZ	EM	14250,8	1420,3	21,1	15,5	15,7	10,2	7,7	6,9	7	6,5	5,8	5,9	5,2
	RCME	14250,9	1763,2	26,9	20,9	20,9	13,5	9	7,9	7,9	7,3	6,5	6,5	5,8
	DEE	50,5	1081,6	17,3	14,5	14,3	9,2	4,8	4	3,8	3,5	3,1	2,8	2,6

Fuente: Elaboración de los autores en base a Chait y Lancelotti (2025).

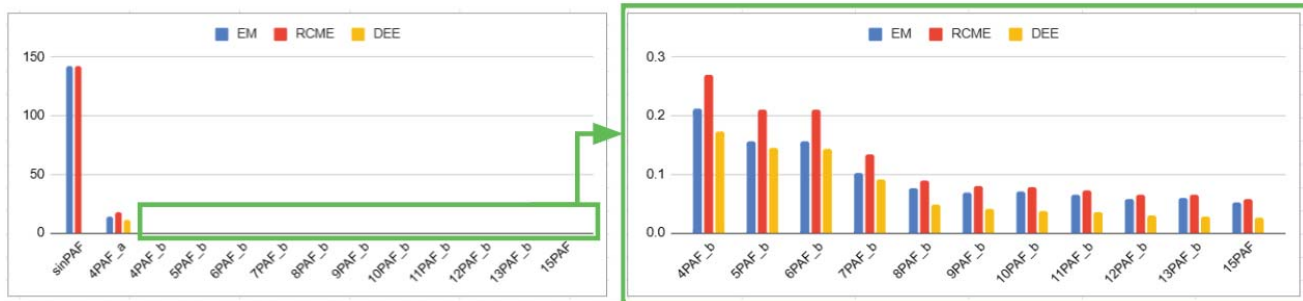


Figura 6. Detalle de errores estadísticos (EM, RCME y DEE) de cada uno de los modelos cartográficos según cantidad y distribución de PAF registrados con EETT, ordenados de mayor a menor EM promedio.

Fuente: elaboración de los autores.

3.2. Altura de vuelo

Con la misión efectuada a 100 m AGL se obtuvieron 120 fotogramas que cubrieron una superficie de 24,5 hectáreas. Se generó por restitución un par MDE-ortofoto utilizando 15 PAF georreferenciados según datos de la EETT que arrojó una resolución en el MDE de 16 cm/pix; y en la ortofoto una resolución de 3.99 cm/pix. Estos resultados se utilizaron para comparar con los obtenidos a 50 m AGL, presentados en el apartado anterior, comparando restituciones realizadas en ambos casos con 15 PAF.

La tabla 2 muestra los cálculos estadísticos obtenidos según la altura de vuelo. Se observa así, que el EM promedio de las coordenadas XYZ es de 5,23 cm en el modelado generado a partir de imágenes capturadas a 50 m AGL, y de 6,04 cm en el modelado generado con imágenes capturadas a 100 m AGL. La diferencia entre ambos modelados es menor a 1 cm, a pesar de la diferencia en el tamaño de píxel, que se duplica entre un modelado y otro (16 cm a 100 AGL y 7.86 cm a 50 AGL).

Comparando la resolución de las ortofotos, se observa que a 50 m AGL se obtienen píxeles de 1,97 cm, y de 3,99 cm (casi el doble) en el modelado a 100 m. Esto produce, en el segundo caso, márgenes más difusos en la identificación de formas (Figura 7). En términos cualitativos, se observa una menor utilidad relativa en estas últimas.



Figura 7. Detalle del marcador M2 visto en la ortofoto generada a partir de misiones de vuelo realizadas a diferente altura: Izquierda: 50 m AGL; Derecha: 100 m AGL.

Fuente: elaboración de los autores.

Tabla 2. Errores estadísticos (EM, RCME, DEE, $E_{\max}$) en los planos X, Y, Z, y promedio general XYZ correspondientes a los MDE realizados a partir de vuelos a 50 m y a 100 m AGL.

Eje	Mediciones (cm)	50 m AGL	100 m AGL
X	EM	0,45	-0,95
	RCME	3,27	3,98
	DEE	3,35	4
	$E_{\max}$	7,2	7,5
Y	EM	-0,75	-0,12
	RCME	4,42	4,04
	DEE	4,51	4,18
	$E_{\max}$	9,6	-8
Z	EM	0,65	-1,48
	RCME	1,81	3,4
	DEE	1,75	3,17
	$E_{\max}$	3,85	-9,17
Promedio XYZ	EM	5,23	6,04
	RCME	5,79	6,84
	DEE	2,58	2,78

Fuente: Elaboración de los autores.

3.3. Instrumental de medición

Los resultados de la restitución fotogramétrica de imágenes utilizando puntos acotados con nivel óptico, tanto a 50 como a 100 m AGL se diferenciaron según el procedimiento utilizado. La tabla 3 muestra los cálculos estadísticos obtenidos según el instrumental utilizado, y según altura de vuelo.

Tabla 3. Errores estadísticos (EM, RCME, DEE, $E_{\max}$) en los planos X, Y, Z, y promedio general XYZ correspondientes a los MDE realizados a partir de vuelos a 50 m y a 100 m AGL con 15 PAF medidos según EETT o nivel óptico con y sin escalado de distancias.

Eje	Medidas (cm)	50 m AGL con EETT	50 m AGL con Niv.Op.	50 m AGL con Niv.Op. y escalado	100 m AGL con EETT	100 m AGL con Niv.Op.	100 m AGL con Niv.Op. y escalado
X	EM	0,45	95,51	94,87	-0,95	179,61	194,99
	RCME	3,27	159,09	97,95	3,98	195,91	329,09
	DEE	3,35	131,7	25,23	4	81	274,4
	$E_{\max}$	7,2	333,4	143,3	7,5	326,1	601,5
Y	EM	-0,75	-66,27	-60,46	-0,12	-246,92	-260,51
	RCME	4,42	105,83	71,22	4,04	273,09	294,4
	DEE	4,51	85,41	38,96	4,18	120,75	141,93
	$E_{\max}$	9,6	-183,3	-155,2	-8	-434,1	-494,6
Z	EM	0,65	-1,64	-0,56	-1,48	-2,07	-1,64
	RCME	1,81	2,46	2,16	3,4	3,47	3,17
	DEE	1,75	1,89	2,16	3,17	2,88	2,81
	$E_{\max}$	3,85	-4,26	-6,09	-9,17	-9,32	-6,3
Promedio XYZ	EM	5,23	170,93	115,74	6,04	326,99	418,74
	RCME	5,79	197,8	125,37	6,84	347,91	457,06
	DEE	2,58	88,44	36,96	2,78	80,51	145,05
Distancias XY	EM	3,1	-218,2	-11,78	2,47	-386,85	-11,7
	RCME	4,17	240,38	20,04	3,36	428,9	36,46
	DEE	4,23	278,18	23,14	4,05	495,78	42,24
Promedio (XY),Z	EM (XY)Z	3,17	218,21	11,79	2,88	386,86	11,81

Fuente: Elaboración de los autores.

En primer lugar, se utilizaron las coordenadas X e Y correspondiente al GPS navegador y se reemplazó la coordenada Z del mismo por el dato registrado con nivel óptico. De este modo, las coordenadas X e Y arrojaron un EM de 95,87 cm y -66,27 cm respectivamente (vuelo a

50 m AGL) y de 179,61 cm y -246,92 cm respectivamente (vuelo a 100 m AGL). En el eje Z se obtuvo un EM de -1,64 cm (vuelo a 50 m AGL) y -2,07 cm (vuelo a 100 m AGL). Se observa que, comparado con los datos obtenidos de la restitución con EETT, las diferencias en el eje X son casi 20 mayor, en el eje Y van de 10 a 20 veces mayor, en tanto que en el eje Z la diferencia es de sólo 1 cm y 0,5 cm en cada caso. En síntesis, hay precisión y exactitud en el eje Z (el dato medido con nivel óptico), pero se sostendrá el error estándar del GPS navegador en los ejes XY.

Cuando se utilizaron medidas de distancia entre marcadores para escalar el modelado en sus ejes XY, el resultado cambió. Los datos referentes al eje Z mejoran en exactitud, reduciendo el error a 1 mm. Sin embargo, se registra también una baja en la exactitud general de los productos modelados del orden de los 115,74 cm y 418,74 de EM promedio a 50 m AGL y 100 M AGL respectivamente. Respecto a la precisión interna del modelado (es decir, la relación interna de proporciones entre los ejes X, Y y Z del modelado), el EM tiene alcanza un valor de poco más de 11 cm ya sea a 50 m o a 100 m AGL, que es un muy buen resultado. Esto es el resultado del desplazamiento en los ejes XY que no implica deformación sino traslación y/o rotación en estos ejes.

4. Conclusiones

La precisión y exactitud de los productos cartográficos es una aspiración que motiva los avances en geotecnologías. Sin embargo, son los objetivos que orientan la utilización de la cartografía lo que, en última instancia, determinan los umbrales de error tolerables, los cuales varían en función de la disciplina, el tipo de análisis y la escala de implementación.

En la actualidad, los levantamientos topográficos de pequeña y mediana escala recurren cada vez con mayor frecuencia al empleo de drones, buscando minimizar costos de tiempo, dinero y recursos humanos, al mismo tiempo que aumentan la calidad y precisión de los resultados, como hemos detallado en los antecedentes. Sin embargo, se reafirma la

necesidad de contar con puntos de control en el terreno para garantizar la validez de los productos, aun cuando se utilicen equipos con tecnología RTK o PPK.

El presente trabajo comparó diferentes metodologías de levantamiento topográfico con RPA, con el propósito de ofrecer un marco de referencia útil para la planificación del trabajo de campo. Los resultados son de aplicación potencial en diversos ámbitos vinculados con la gestión de recursos naturales y culturales, la producción agropecuaria, la arqueología, la biología, la geografía y el ordenamiento territorial.

Respecto a la cantidad y distribución de PAF, los modelos generados sin puntos de apoyo fotogramétrico (PAF), basados únicamente en el GPS del RPA, presentan errores de precisión y exactitud en los tres ejes. Esto, en especial en el eje Z, siendo del orden de los 2-3 m en los ejes XY, y de 140 m en el eje Z (coherentes con los errores de un GPS navegador). Aunque la ortofoto asociada puede presentar buena información sobre los objetos presentes en la superficie terrestre, esto último dependiendo de la altura de vuelo, desaconsejamos su utilización como modelos topográficos.

En cambio, la incorporación de entre 4 y 7 PAF redujo considerablemente los errores a valores entre 21 y 10 cm progresivamente en los tres ejes. Sin embargo, una distribución inadecuada de los PAF conlleva también deformaciones notables (en nuestro caso, véase el modelado 4PAF-a y 4PAF-b). A partir de 8 a 15 PAF los errores descendieron a entre 7 y 5 cm. Estos últimos son la mitad del tamaño del píxel del MDE y 2 veces el tamaño del píxel del ortomosaico. Estos niveles de precisión permiten realizar cálculos de altitud, distancias, y volúmenes en forma confiable, como así también sus productos derivados (pendiente, sombreado, orientación, curvatura, etc.) a todas las escalas de representación espacial. El tiempo que insume distribuir 5 marcadores en el terreno, o distribuir 9-10 marcadores es prácticamente el mismo, pero el tiempo que insume la medición de los mismos variará en función del equipamiento utilizado.

Respecto a la altura de vuelo, la comparación entre vuelos a 50 m y 100 m AGL mostró que la diferencia en la precisión de los MDE es menor a 1 cm. Aunque la calidad de las ortofotos difiere notablemente. Su utilidad depende de la disciplina de aplicación del modelado. Una menor altura de vuelo favorece la definición de rasgos morfológicos finos, mientras que una mayor altura implica ventajas operativas: reducción del tiempo de campo, menor consumo de baterías y menor carga de procesamiento en gabinete y de recursos informáticos necesarios para la restitución fotogramétrica. La elección, por lo tanto, debe responder a la escala de análisis requerida y al tipo de información necesaria para el diagnóstico territorial.

Respecto al equipamiento de registro de PAF, la precisión medida con EETT o con nivel óptico, no muestra diferencias sustanciales en el eje Z. Aunque, sí se observa una disminución en la precisión en los ejes X e Y. Esto deriva del error estándar del GPS navegador en estos ejes. Para que los modelados que resultan de la restitución fotogramétrica de PAF medidos con nivel óptico sean de alta precisión, deben ser escalados, tomando medidas de distancias entre marcadores durante el trabajo de campo. Con este procedimiento se aumenta considerablemente la precisión interna del modelado. Considerando que ésta constituye una buena alternativa de bajo costo, para el trabajo con modelos que no requieren exactitud geodésica pero sí alta consistencia interna. Otra diferencia deviene del tiempo que demanda el registro con EETT respecto del registro con nivel óptico, siendo el primer instrumento, más eficiente.

En síntesis, la incorporación de 5 a 7 PAF implica un EM de 15,5cm 10,2 cm, siendo suficiente para las aplicaciones a escalas 1:500 en adelante. De 8 a 15 PAF se reduce el EM de 7,5 a 5,2 cm, siendo útiles para todas las escalas de representación cartográfica. La altura de vuelo impacta poco sobre la precisión del MDE, pero afecta la identificación de formas en la ortofoto. La exactitud geodésica medida con EETT o con nivel óptico escalado con medidas de distancia para este tipo de relevamientos arroja resultados dispares, sin embargo, la precisión de ambos productos muestra una fuerte coherencia al interior de ambos modelados, resultado útil para la mayoría de las aplicaciones.

Las alternativas para la obtención de modelos topográficos ofrecen un abanico que va desde equipamientos de bajo y alto costo (nivel óptico y EETT respectivamente), mayor o menor transportabilidad del instrumental (nivel óptico y EETT respectivamente), mayor o menor tiempo de trabajo de campo (nivel óptico y EETT respectivamente), mayor o menor cantidad de tiempo de trabajo de campo (menor o mayor altura de vuelo respectivamente), mayor o menor precisión y/o exactitud alcanzados (variando cantidad y distribución de PAF en terreno y combinando las variables anteriores). La combinación de variables —cantidad y distribución de PAF, tipo de instrumental, altura de vuelo y procedimientos de medición— permite ajustar los relevamientos según los recursos disponibles y el nivel de exactitud requerido, garantizando una gran flexibilidad de aplicación.

Desde la perspectiva de la Geografía Aplicada y el ordenamiento territorial, los aportes de este estudio trascienden el plano técnico. La generación de información espacial precisa y adaptable se convierte en una herramienta estratégica para diagnosticar procesos territoriales, identificar potenciales conflictos de uso del suelo, delimitar áreas de riesgo o vulnerabilidad ambiental, y fundamentar políticas públicas orientadas a la gestión sostenible. Además, el acceso a metodologías que pueden ajustarse a distintas condiciones económicas y técnicas favorece la democratización de los insumos cartográficos, fortaleciendo la capacidad de decisión de gobiernos locales, instituciones académicas y actores sociales.

Por último, el uso de RPA en relevamientos topográficos no solo mejora la calidad y eficiencia de los productos cartográficos, sino que también constituye un insumo clave para la planificación territorial. Al vincular los avances tecnológicos con la gestión de los recursos naturales y culturales, este trabajo reafirma el rol de la Geografía Aplicada como disciplina puente entre la innovación técnica y la construcción de territorios más equilibrados, resilientes y sostenibles.

6. Agradecimientos

El trabajo de campo contó con la colaboración del Ing. Agr. Marcos A. Reche (selección de lotes), Karen Casenave (registro de imágenes oblicuas con drone) y Federico Gauna (coloración de marcadores en terreno). La investigación se realizó con el apoyo del Instituto de las Culturas (UBA-CONICET) y del LabSIG-PRODISIG de la Universidad Nacional de Luján, en el marco del proyecto UNLu-PIA-2023-005.

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

- Bonvecchi, V. E., Bulos, L., Irigoin, J., Montes Galbán, E., Petrsek, M.R., Ramírez, J. de los A., Reche, M. A., Tenti Vuegen, L., Trabichet, F., y Wagner, M. V. (2024). *Capas de información geográfica. Campo experimental de la Universidad Nacional de Luján* [Data set]. <https://www.cidepa.unlu.edu.ar/?q=node/40>
- Buzai, G. D. (1999). *Geografía global*. Buenos Aires: Lugar Editorial.
- Buzai, G. D. (2001). Paradigma geotecnológico, geografía global y cibergeografía, la gran explosión de un universo digital en expansión. *GeoFocus*, 1, 24–48. <https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/313>
- Chait, F. N. y Lanzelotti, S. L. (2025) Datos de base y errores estadísticos (EM, RCME, DEE, Emáx) calculados para cada Punto de Apoyo Fotogramétrico registrado en el Centro de Investigación, Docencia y Extensión Agropecuaria de la Universidad Nacional de Luján. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (dataset). <http://hdl.handle.net/11336/272320>

- Domínguez Pérez, C. y Martínez González, J. (2019). El uso de drones en la investigación arqueológica: Fotogrametría y productos derivados. *Cuadernos del Sur*, 24(4), 72–89. <https://doi.org/10.4067/S0717-73562021005001902>
- Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina [IGN]. (2019). *Capas SIG*. <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG>
- Jiménez-Jiménez, S. I., Ojeda-Bustamante, W., Ontiveros-Capurata, R. E., Flores-Velázquez, J., Marcial-Pablo, M. J. y Robles-Rubio, B. D. (2017). Quantification of the error of digital terrain models derived from images acquired with UAV. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 9(2), 85–100. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2017.03.007>
- Lanzelotti, S. L., Chait, F. N., y Lamamí, M. A. (2025). Evaluación de la precisión planialtimétrica de productos cartográficos basados en la utilización de RPA/drone aplicado a sitios arqueológicos. *Comechingonia. Revista de Arqueología*, 29(3), 307–329. <https://doi.org/10.37603/2250.7728.v29.n3.48020>
- Moreno Jiménez, A. (2013). Entendimiento y naturaleza de la científicidad geotecnológica: Una aproximación desde el pragmatismo epistemológico. *Investigaciones Geográficas*, 60, 5–36. <https://doi.org/10.14198/INGEO2013.60.01>
- Novara, M. y Jacamo, E. (2020) Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) para la generación de Modelos Digitales Superficies de alta resolución. Aportes metodológicos sobre las distintas alturas de vuelo. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG)* 17(I): 1-18.
- Reche, M. A. (2024). *Estudio de caso para la evaluación de precisiones obtenidas en relevamientos topográficos utilizando VANT: Navegador GPS vs. puntos de apoyo fotogramétrico*. Trabajo final de Especialización. Especialización en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica aplicados al estudio del medio ambiente de la Universidad Nacional de Luján. <https://ri.unlu.edu.ar/xmlui/handle/rediunlu/2780>

Santecchia, G. S., Neuman, K. R. y Span, J. M. (2023). Mejora de la Exactitud Altitudinal de los MDS Generados con VANT incorporando PAF en altura. *Revista especializada en Ingeniería y Ciencias de la Tierra* 3(1): 8-25. <https://doi.org/10.48204/reict.v3n1.3947>

Localización y distribución espacial de los centros de distribución en la Gran Región Centro de México: análisis megaregional

Location and Spatial Distribution of Distribution

Centers in the Greater Central Region of Mexico: A

Megaregional Analysis

Oscar Alcocer García¹ y Juan Campos Alanís^{2*}

¹Secretaría de Desarrollo Económico del Gobierno del Estado de México, Av. Primero de Mayo N° 1731 esq. Robert Bosch, Col. Zona Industrial, Toluca de Lerdo, México, C.P. 50071. alcocergarcia@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-7367-8639>

²Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México, Cerro Coatepec s/n Ciudad Universitaria, Toluca de Lerdo, México, C.P. 50110. jcamposa@uaemex.mx, <https://orcid.org/0000-0002-5391-2447>

*Autor(a) de Correspondencia

Recibido: 20/10/2025. Aceptado: 17/12/2025. Publicado: 05/02/2026.

Cómo citar este artículo: Alcocer García, O. y Campos Alanís, J. (2026). Localización y distribución espacial de los centros de distribución en la Gran Región Centro de México: análisis megaregional. *Geografía Aplicada*, 2(1), 75-111.

Resumen

El estudio de la logística desde enfoques organizacionales, funcionales y de competitividad representa las principales tendencias en la literatura en México y en otros países latinoamericanos; sin embargo, existe un vacío en su análisis desde perspectivas de organización geográfica. En este contexto, el presente texto analiza a escala megaregional,

a los Centros de Distribución (CEDIS) como componentes clave de la actividad logística y su localización dentro de la Gran Región Centro de México (GRCM), con el objetivo de contextualizarlos tanto en términos estadísticos y espaciales, como elementos integrados de la red logística.

Para ello se georreferenciaron los CEDIS en la GRCM, consultando el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) del INEGI y complemento por un barrido virtual a través de visores cartográficos. Para identificar agrupaciones, se empleó *Kernel Density*, utilizando ArcMap 10.8, contemplando su ubicación y la variable de empleo.

Los resultados muestran que los CEDIS se concentran en el Estado de México y conforman agrupaciones sobre el corredor México–Querétaro, eje fundamental para los flujos comerciales entre la capital del país y el norte de México. Asimismo, se observa que su locación se da preferentemente en parques industriales con características logísticas y que fueron desarrollados por firmas especializadas del sector inmobiliario. No obstante, pese a la importancia en el funcionamiento de la economía regional y nacional, persisten desafíos derivados de la ausencia de políticas públicas integrales orientadas a la gestión y fortalecimiento de estos elementos del sector logístico.

Palabras clave: Centros de Distribución, Gran Región Centro de México (GRCM), localización espacial, megaregional, clusters, parques logísticos, infraestructura logística.

Abstract

The study of logistics from organizational, functional, and competitiveness perspectives represents the main trends in the literature in Mexico and other Latin American countries; however, there is a gap in analyses addressing logistics from the perspective of geographical organization. In this context, this study analyzes, at a megaregional scale, Distribution Centers (DCs) as key components of logistics activity and examines their spatial location within the Greater Central Region of Mexico (GCRM), with the aim of contextualizing them in both statistical and spatial terms as integrated elements of the logistics network.

To this end, DCs in the GCRM were georeferenced using data from the National Statistical Directory of Economic Units (DENUE), complemented by a virtual survey using online cartographic viewers. Kernel Density analysis was applied using ArcMap 10.8 to identify spatial clusters, considering both location and employment variables.

The results show that DCs are highly concentrated in the State of Mexico, forming clusters along the Mexico–Querétaro corridor, a key axis for commercial flows between the country’s capital and northern Mexico. Additionally, DCs are predominantly located in industrial parks with logistics-oriented characteristics developed by specialized real estate firms. However, despite their importance to regional and national economic functioning, significant challenges persist due to the lack of comprehensive public policies aimed at managing and strengthening these components of the logistics sector.

Keywords: Distribution Centers, Greater Central Region of Mexico (GCRM), spatial location, megaregional scale, clusters, logistics parks, logistics infrastructure.

1. Introducción

La crisis de salud provocada por el COVID-19, que inició en 2019 en China y que llegó a México en febrero de 2020 (Secretaría de Salud, 2020), evidenció la importancia de la actividad logística para la distribución de bienes y servicios esenciales, no sólo para la provisión de la industria, sino de productos básicos para la población como alimentos e insumos médicos.

En 2020, pese a la contracción económica derivada de la pandemia, el sector logístico (48 - 49 Transportes, correos y almacenamiento) mostró cifras positivas en la Gran Región Centro de México (GRCM), en contraste con el saldo negativo promedio a nivel nacional. De acuerdo con el Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), se crearon 228 nuevas empresas (patrones) y poco más de 11 mil 100 empleos (IMSS, 2020a; IMSS, 2020b).

La importancia del sector logístico para la economía de las naciones oscila entre el 8 y el 15% de la aportación a su Producto Interno Bruto (PIB) (Moreno Blat et al., 2018). Por si

fuese poco, las condiciones logísticas y su capacidad para recibir y enviar mercancías juegan un papel clave en la medición de su competitividad y en consecuencia de la calidad de vida de sus habitantes.

La organización espacial de la actividad económica como resultado de los cambios estructurales, tecnológicos y en particular de la globalización, el comercio mundial se expandió, al igual que la fabricación y distribución de bienes por todo el planeta (Hesse, 2008). Lo cual no hubiese sido posible sin la evolución de la organización logística contemplando sus diferentes etapas, medios de transporte e infraestructura de manejo y almacenamiento de mercancías.

Es así como este texto se centra en una de las últimas etapas (infraestructura) del proceso logístico, los denominados centros de distribución (CEDIS), los cuales desde la geografía han recibido poca atención, en México es casi nula. A nivel internacional, desde la geografía económica y del transporte, diversos estudios señalan que los CEDIS tienden a concentrarse en zonas periféricas con accesibilidad a ejes carreteros, nodos ferroviarios y aeropuertos, con el fin de reducir costos logísticos y optimizar los tiempos de entrega (Hesse, 2008; Rodrigue, 2004; Dablanc y Ross, 2012). Algunas investigaciones basadas en entrevistas sectoriales han identificado que, si bien intervienen factores como los costos logísticos, el nivel de servicio y la estrategia empresarial, no existe un modelo que explique su localización, sino combinaciones de decisiones por condiciones territoriales (Warffemius, 2007; Onstein et al., 2020).

El objetivo de este estudio es describir el comportamiento espacial de los CEDIS que operan en la GRCM, considerando su papel como elemento clave en la actividad logística. La investigación se plantea responder cuestionamientos como si la localización de los Centros de Distribución en la GRCM responde a tendencias internacionales; asimismo, se cuestiona si existe un proceso de exurbanización en zonas periféricas o en los límites urbanos de la megaregión, y, finalmente, si los servicios e infraestructuras asociados a la actividad logística inciden en su localización. Siendo una de las principales aportaciones, además de

identificar las agrupaciones (*clusters*), contribuir al análisis de la actividad logística en México a escala megaregional, así como generar insumos que favorezcan el diseño de estrategias y políticas públicas orientadas a fortalecer este sector.

El texto se estructura en seis principales apartados, el primero corresponde a la introducción; un segundo, integra una revisión sobre los factores que inciden en la localización de los CEDIS; en el tercer punto, apartado metodológico, se realiza un análisis de zona y escala de estudio, además del origen de los datos y el método empleado; en un cuarto se integran los resultados; y, finalmente, en el quinto y sexto, se contemplan uno de discusión y otro de conclusiones.

2. Bosquejo teórico

2.1. Centros de distribución

La relación entre la geografía y la logística se ha centrado gran parte de su atención en el transporte y la movilidad de mercancías, entendidos como componentes clave de la cadena de suministro. Sin embargo, esta no sólo debe limitarse al transporte, sino también a los espacios emisores y receptores que generan los flujos de mercancías en ámbitos globales, nacionales y locales. Estos espacios de manejo de mercancías han sido denominados de distintas formas, no importando sus características, a lo largo del tiempo como bodegas, almacenes y, más recientemente, CEDIS definidos por características específicas.

Existen diferentes tipos de CEDIS, concebidos como intermediarios entre la planta de producción y los centros de demanda. Su clasificación puede variar según su tamaño, función o jerarquía, y presentan límites en cuanto al espacio de almacenamiento, el tipo de producto y la capacidad de manejo (Kasilingam, 1998).

2.2. Localización de Centros de Distribución (CEDIS)

Diferentes factores influyen en la localización de los CEDIS, los cuales siempre dependen de su tipo y objetivo. Sin embargo, no existe en la literatura un marco conceptual validado

empíricamente que respalde dichos factores y que mucho menos considere a países con distintos niveles de desarrollo o contextos según los grados de urbanización e infraestructura (Onstein et al., 2020).

En este sentido, algunos de los estudios más sobresalientes son a partir de entrevistas, por ejemplo, la propuesta desarrollada por Onstein, Tavasszy y Van Damme (2019 citado en Onstein et al., 2020), concluyen y agrupan los factores de localización en siete grupos. Estos a su vez se basan en dos campos de estudio principales: la gestión de la cadena de suministro y la geografía económica. Las siete categorías propuestas comprenden: el nivel de servicio, los costos logísticos, la estrategia empresarial, el patrón de demanda, las características del producto, factores de ubicación y factores institucionales.

Respecto a los factores de ubicación, según los mismos autores, cobra importancia la accesibilidad a medios de transporte como el carretero; a instalaciones ferroviarias; proximidad a puertos y aeropuertos; disponibilidad de tierra; disponibilidad de mano de obra; y, por supuesto, proximidad al mercado de consumo, lo cual permite una entrega rápida y a menor costo.

Warffemius (2007) también a través de entrevistas con líderes en el sector, realiza un resumen de los factores que inciden en que los CEDIS de Europa se instalen en Países Bajos en lugar de en cualquier otro país de la Unión Europea, identificando como los más importantes los siguientes: la conexión marítima (puerto de Róterdam), la conexión aérea (aeropuerto Ámsterdam-Schiphol), la conexión de transporte terrestre a otras ciudades europeas, la proximidad a áreas de mercado, el acceso a servicios logísticos y técnicos, las políticas aduaneras y fiscales, así como la calidad, cantidad y costos de la mano de obra.

Además de que los factores de localización, requieren múltiples decisiones y negociaciones, así como una combinación de análisis cuantitativos como cualitativos. Dado a que, según la literatura, no existe un modelo cuantitativo que prediga la ubicación de determinados centros de distribución (Dablanc y Ross, 2012; Onstein et al., 2020).

2.3. La “reconfiguración” de la logística

A nivel mundial, hacia finales de la década de 1950, la gestión de la distribución física de mercancías comenzó a consolidarse como una actividad empresarial estratégica. Las empresas identificaron una ventaja significativa en la reducción de costos logísticos a partir de la incorporación de conceptos como el marketing y la segmentación de mercados, lo que generó presión para optimizar los canales de distribución. Todo ello ocurrió de manera paralela al avance y perfeccionamiento de los equipos tecnológicos y del procesamiento electrónico de datos (Lynagh, 1971).

En México los cambios más significativos en materia infraestructura logística se dieron a partir de la década de los noventa, propiciando así lo que consideramos como el punto de partida de la “reconfiguración” de la logística mexicana, donde el gobierno federal reconocía la importancia de la infraestructura de comunicación para el adecuado funcionamiento del sector logístico en el país.

Casi tres décadas atrás, con la apertura del país al comercio internacional mediante el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN), los distintos sectores de la economía se vieron obligados a adaptarse a nuevas dinámicas. Algunas empresas aprovecharon este proceso como una oportunidad para ampliar sus mercados, considerando no solo sus capacidades productivas y de infraestructura disponible, sino también la forma en que la organización del transporte de mercancías podría potenciar sus procesos productivos y comerciales. En ese momento, la logística dejó de centrarse únicamente en la calidad de los productos o servicios, para incorporar como factor estratégico la eficiencia en el traslado de mercancías (Bentazo, 1995).

3. Metodología

3.1. Análisis megaregional como escala de estudio

El área de estudio propuesta y a la que definimos como la Gran Región Centro de México (GRCM), esto bajo la premisa de que el análisis a escala megaregional mitiga el sesgo de

delimitar zonas de estudio arbitrarias, dado que los fenómenos logísticos y comerciales trascienden límites urbanos, estatales, municipales e incluso nacionales. Esta perspectiva cuenta con antecedentes, por ejemplo, Dewar y Epstein (2007), en un estudio a nivel de megaregiones en Estados Unidos muestra cómo los ejercicios de planeación conjunta resultan útiles para implementar políticas públicas a esta escala.

En la misma línea, Ross et al. (2008) sostienen que las megaregiones, particularmente en contextos como el estadounidense, constituyen espacios donde emergen economías innovadoras y redes de valor en entornos urbanos sostenibles. Estas se definen como redes de centros metropolitanos interconectados funcionalmente en dimensiones económicas, ambientales, culturales y de infraestructura, superando fronteras administrativas. Los estudios a esta escala, pese a la complejidad de medir interacciones espaciales, pueden orientar inversiones y políticas públicas que deriven una mayor competitividad económica y fomentar la cooperación interjurisdiccional.

La relevancia de este enfoque se ejemplifica en Estados Unidos —principal socio comercial de México—, también a través de la iniciativa *Plan Regional - America 2050* (Regional Plan Association, 2002) que propone una visión de crecimiento regional que incluye, entre sus cinco objetivos clave, el fortalecimiento logístico mediante redes de transporte multimodal y la consolidación de megaregiones globalmente competitivas. México, dada su interdependencia económica con este país, ha adoptado medidas progresivas para alinearse con dicha estrategia por lo menos desde los años noventa y posterior a la firma y entrada en vigor del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN), hoy T-MEC, entre México, Canadá y Estados Unidos.

En síntesis, la actividad logística, al igual que otros procesos de urbanización, deben analizarse a escala megaregional (Wheeler, 2009). Esto se debe, en primer lugar, a que su operación física de los procesos logísticos, siguen siendo vigentes e incluso se han intensificado, incorporando además una serie de flujos intangibles vinculados a la logística, como los asociados al comercio electrónico, tales como la gestión de pedidos y manejo de

inventarios. Estos flujos, aparentemente virtuales, dependen de manera directa de infraestructura física, como las redes de telecomunicaciones o los centros de procesamiento de datos.

La delimitación a escala megaregional resulta pertinente para analizar actividades logísticas, dado que las áreas de mercado y de transporte de mercancías son impulsadas por cadenas de suministro globales y operan en niveles supraurbanos, además de que se organizan espacialmente en redes regionales (Dablanc y Ross, 2012). Como señalan estos autores, las megaregiones constituyen "redes que conectan centros metropolitanos y sus áreas circundantes mediante interacciones ambientales, económicas y de infraestructura".

3.2. La Gran Región Centro de México (GRCM) como zona de estudio

Este estudio define como área de análisis a la Gran Región Centro de México (GRCM), la cual se conforma por la integración de tres zonas metropolitanas: la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) y la Zona Metropolitana de Tianguistengo (ZMT), de acuerdo con la delimitación oficial para zonas metropolitanas establecida por la SEDATU, CONAPO e INEGI (2023).

En conjunto, la GRCM está integrada por 98 demarcaciones territoriales (alcaldías y municipios) pertenecientes a tres entidades federativas: Ciudad de México, Estado de México e Hidalgo (Figura 1 y Tabla 1).

La fundamentación de esta delimitación, además de la escala y funcionalidad, se sustenta en tres dimensiones clave: a) Importancia económica, la Ciudad de México (9.8% del PIB) y Estado de México (9.0%) ocupan el primer y segundo lugar nacional en contribución del Producto Interno Bruto (PIBE-INEGI, 2022); b) Tamaño de su población y mercado potencial, la GRCM conforma el mayor mercado de consumo de América Latina con una población próxima a 24 millones de consumidores potenciales (SEDATU, CONAPO e INEGI, 2023:177, 215 y 221); y finalmente, c) Integración funcional y flujos, entre la ZMVM y ZMVT se presentan la mayor cantidad de flujos de *commuters* intermetropolitanos en comparación

con el resto de las zonas metropolitanas de México (Romo y Velázquez, 2019). En 2023, sólo como ejemplo, el entonces Gobernador del Estado de México, Alfredo del Mazo Maza, citaba que entre ZMVM y la ZMVT los viajes diarios por automóvil sobre la carretera México-Toluca ascendía a más de 700 mil (Gobierno del Estado de México, Del Mazo, 2023).

Tabla 1. Demarcaciones territoriales (alcaldías y municipios) que integran la Gran Región Centro de México (GRCM).

No.	Entidad	Alcaldía/municipio	No.	Entidad	Alcaldía/municipio	No.	Entidad	Alcaldía/municipio	No.	Entidad	Alcaldía/municipio
1	CDMX	Álvaro Obregón	26	EDOMEX	Axapusco	51	EDOMEX	Lerma	76	EDOMEX	Tepotzotlán
2	CDMX	Tlalpan	27	EDOMEX	Ayapango	52	EDOMEX	Melchor Ocampo	77	EDOMEX	Tequixquiac
3	CDMX	Cuauhtémoc	28	EDOMEX	Calimaya	53	EDOMEX	Metepec	78	EDOMEX	Texcalyacac
4	CDMX	Venustiano Carranza	29	EDOMEX	Capulhuac	54	EDOMEX	Mexicaltzingo	79	EDOMEX	Texcoco
5	CDMX	Tláhuac	30	EDOMEX	Coacalco de B.	55	EDOMEX	Naucalpan de J.	80	EDOMEX	Tezoyuca
6	CDMX	Azcapotzalco	31	EDOMEX	Cocotitlán	56	EDOMEX	Nextlalpan	81	EDOMEX	Tianguistenco
7	CDMX	Coyoacán	32	EDOMEX	Coyotepec	57	EDOMEX	Nicolás Romero	82	EDOMEX	Tlalmanalco
8	CDMX	Xochimilco	33	EDOMEX	Cuautitlán	58	EDOMEX	Nopaltepec	83	EDOMEX	Tlalnepantla de Baz
9	CDMX	Cuajimalpa de M.	34	EDOMEX	Chalco	59	EDOMEX	Ocoyoacac	84	EDOMEX	Tultepec
10	CDMX	Miguel Hidalgo	35	EDOMEX	Chapultepec	60	EDOMEX	Otumba	85	EDOMEX	Tultitlán
11	CDMX	La Magdalena C.	36	EDOMEX	Chiautla	61	EDOMEX	Ozumba	86	EDOMEX	Villa del Carbón
12	CDMX	Iztapalapa	37	EDOMEX	Chicoloapan	62	EDOMEX	Papalotla	87	EDOMEX	Zinacantepec
13	CDMX	Iztacalco	38	EDOMEX	Chiconcuac	63	EDOMEX	La Paz	88	EDOMEX	Zumpango
14	CDMX	Milpa Alta	39	EDOMEX	Chimalhuacán	64	EDOMEX	Rayón	89	EDOMEX	Cuautitlán Izcalli
15	CDMX	Benito Juárez	40	EDOMEX	Ecatepec de M.	65	EDOMEX	San Antonio la Isla	90	EDOMEX	Valle de Chalco S.
16	CDMX	Gustavo A. Madero	41	EDOMEX	Ecatzingo	66	EDOMEX	San Martín de las P.	91	EDOMEX	Tonanitla
17	EDOMEX	Acolman	42	EDOMEX	Huehuetoca	67	EDOMEX	San Mateo Atenco	92	EDOMEX	Xonacatlán
18	EDOMEX	Almoloya de Juárez	43	EDOMEX	Hueyopxtla	68	EDOMEX	Tecámac	93	EDOMEX	Temoaya
19	EDOMEX	Almoloya del Río	44	EDOMEX	Huixquilucan	69	EDOMEX	Temamatla	94	EDOMEX	Otzolotepec
20	EDOMEX	Amecameca	45	EDOMEX	Isidro Fabela	70	EDOMEX	Temascalapa	95	EDOMEX	Tenango del Valle
21	EDOMEX	Apaxco	46	EDOMEX	Ixtapaluca	71	EDOMEX	Tenango del Aire	96	EDOMEX	Toluca
22	EDOMEX	Atenco	47	EDOMEX	Xalatlaco	72	EDOMEX	Teoloyucan	97	EDOMEX	Nezahualcóyotl
23	EDOMEX	Atizapán	48	EDOMEX	Jaltenco	73	EDOMEX	Teotihuacán	98	HIDALGO	Tizayuca
24	EDOMEX	Atizapán de Zaragoza	49	EDOMEX	Jilotzingo	74	EDOMEX	Tepetlaoxtoc			
25	EDOMEX	Atlautla	50	EDOMEX	Juchitepec	75	EDOMEX	Tepetlixpa			

Fuente: elaboración propia.

Aunado a lo anterior, y en favor de una integración funcional, existen dos medios de transporte que conectan estas zonas dentro de la megaregión. En cuanto a la navegación aérea, destaca la conformación del Sistema Aeroportuario Metropolitano (SAM), estrategia de planeación impulsada por el Gobierno Federal a nivel intermetropolitano que toma fuerza con el presidente Vicente Fox Quezada y que lo retoma Andrés Manuel López Obrador. Este sistema integra operativamente al Aeropuerto Internacional de la Ciudad de

México (AICM), el de mayores operaciones en México, al Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles (AIFA) —actualmente el principal aeropuerto de carga aérea del país— y al Aeropuerto Internacional de Toluca (AIT), considerado como una de las principales terminales de aviación ejecutiva en América Latina (Lagunes, 2020; AIFA, 2024; AICM, 2025).

Por otro lado, en lo que respecta a la infraestructura ferroviaria, destacan dos proyectos clave para el transporte de pasajeros suburbanos: el Tren El Insurgente, que conecta la Ciudad de México con Toluca y el nuevo ramal del Tren Suburbano (AIFA-Pachuca). Ambos sistemas ferroviarios permitirán interconectar puntos estratégicos de la capital mexicana con los estados de México e Hidalgo, fortaleciendo así la movilidad e integración megaregional.

3.3. Origen de los datos

Para la conformación de la base de datos geográfica se consultó el Directorio de Unidades Económicas (DENUE) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en la actualización de noviembre de 2023, así como directorios electrónicos comerciales. La estrategia general de identificación de los Centros de Distribución (CEDIS) consistió en la búsqueda nominal de unidades económicas bajo las denominaciones de centro de distribución, cedis, y macrocedis. A partir de este primer resultado, se realizó una depuración de los registros, con el fin de excluir aquellas unidades que no desempeñan funciones logísticas propias de un CEDIS y, así, conservar únicamente aquellas que efectivamente operan como un centro de distribución.

La identificación de los CEDIS se completó por medio de una búsqueda y barrido espacial-virtual de la GRCM durante el primer trimestre de 2024, a través de plataformas como Google Earth y Open Street Map, para georreferenciar aquellos que no encuentran registro en ninguno de los directorios públicos ni privados disponibles. Es necesario advertir, que la actividad logística al no encontrar una delimitación específica dentro del Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (SCIAN), complica no sólo la identificación y

unificación de las unidades económicas que fungen como CEDIS, sino el análisis estadístico y comparativo con otros tipos de indicadores y delimitaciones territoriales.

3.4. Medición de la agrupación (clústeres)

Para el análisis espacial de los CEDIS en la zona de estudio se utilizaron softwares de Sistemas de Información Geográfica (SIG) como Arcmap y Qgis. En particular, para identificar las agrupaciones (*clusters*) se utilizó la herramienta *Kernel Density* en Arcmap 10.8, la cual calcula la densidad de entidades (puntos) en una unidad de área, así como su vecindad y pondera cada elemento en relación con el total. Esta función genera, de forma espacial y gráfica, una superficie en celdas reticulares que se representa en forma de halo alrededor de cada punto o agrupación con mayores valores. El valor de la superficie (densidad) es mayor en el centro y disminuye gradualmente en medida que aumenta la distancia y el peso. La elección del método de densidad *Kernel Density* respondió a la necesidad de mitigar los sesgos asociados al uso de delimitaciones político-administrativas, tales como municipio, localidad, colonia o Área Geoestadística Básica (AGEB), las cuales pueden distorsionar o condicionar los resultados del análisis espacial de los fenómenos geográficos.

La estimación se expresa como (Silverman, 1998:15):

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - X_i}{h}\right)$$

Donde:

- K = función núcleo (*kernel*)
- n = total de CEDIS en el área de estudio.
- x = localización del centro de la celda.
- X_i = ubicación de cada unidad económica catalogada como CEDIS.
- h = ancho de ventana.

La agrupación espacial se evaluó en dos aspectos (*population field*): respecto a la ubicación de las unidades económicas (georreferenciadas) identificadas como Centros de Distribución

y el número promedio de empleos generados por cada unidad económica. En ambos casos, el resultado del *Kernel Density* se representa en un mapa de densidad en formato ráster, cuya paleta de colores refleja la concentración de eventos en las zonas con mayor intensidad colorimétrica. El cual, tras un proceso de reclasificación, se establecieron cuatro rangos de agrupación: muy altos (*hh*), altos (*h*), bajos (*l*) y muy bajos (*ll*).

4. Resultados

Los fenómenos sociales y económicos que se desarrollan en el territorio pueden analizarse desde múltiples disciplinas y enfoques. En el caso de la geografía, como ocurre con otras ciencias sociales, la aproximación no es unidimensional. La perspectiva de la nueva geografía económica, como rama de la geografía humana, permite examinar la organización y el uso del espacio por las actividades productivas.

4.1. Expansión y reconfiguración de la infraestructura de distribución

La creciente demanda de bienes y servicios en entornos urbanos ha impulsado la expansión de redes de distribución a escala internacional. Según Rodrigue (2004), este fenómeno ha estado acompañado por un incremento significativo en el volumen de carga movilizada. En la actualidad, las cadenas del comercio electrónico operan a escala transoceánica; por ejemplo, un pedido realizado en plataformas como Amazon o AliExpress puede provenir de otro país o incluso de otro continente y entregarse en menos de un día o en un plazo mínimo preestablecido. Para alcanzar este nivel de eficiencia, no sólo resultan esenciales los medios de transporte, sino también los espacios especializados en la gestión de inventarios de mercancías, como los Centros de Distribución (CEDIS).

El mismo Rodrigue (2004), refiere que gran parte de las actividades vinculadas con la distribución de mercancías ha experimentado transformaciones derivadas de la creación de nuevas terminales y centros de distribución. Estas modificaciones responden tanto al incremento del consumo como a las nuevas tendencias de las cadenas de suministro.

Históricamente, la configuración de la infraestructura de distribución ha atravesado un proceso de reacomodo que ha derivado en un desplazamiento de los CEDIS hacia las periferias urbanas, donde la accesibilidad por carretera, por ferrocarril o aérea se convierte en un factor estratégico en su localización. En este sentido, Hesse (2008) señala que la logística y la distribución de carga constituyen el eje del comercio mundial y han contribuido a la ampliación de los sistemas de producción. La distribución funciona como una interfaz entre el emisor y el receptor, vendedor y cliente, articulando un entramado que incluye desde áreas portuarias, zonas de exportación, parques logísticos donde operan centros de distribución, patios ferroviarios de carga y áreas comerciales e industriales.

4.2. Centros de Distribución en la Gran Región Centro de México (GRCM)

Hasta el primer trimestre de 2024, dentro de la Gran Región Centro de México (GRCM) operaban 712 Centros de Distribución, de los cuales 564 (el 79%) se ubican en el Estado de México, mientras que 146 (el 20%) estaban en la Ciudad de México y únicamente dos (el 1%) en el estado de Hidalgo. De los 564 que se ubican en la entidad mexiquense, 96 de ellos se ubican en el Valle de Toluca, mientras que 468 operan en municipios mexiquenses conurbados a la Ciudad de México. En la figura 1 se observa el total de CEDIS que operan en la región de estudio, el cual evidencia una mayor concentración al norte de la Ciudad de México, en los municipios conurbados del Estado de México.

Los 712 CEDIS o almacenes que operan en la GRCM emplean a 41,335 personas, de las cuales 31,299 (el 75.7%) están en el Estado de México, mientras que 10,001 (24.2%) se emplean en la CDMX y sólo 35 en Hidalgo (0.1%).

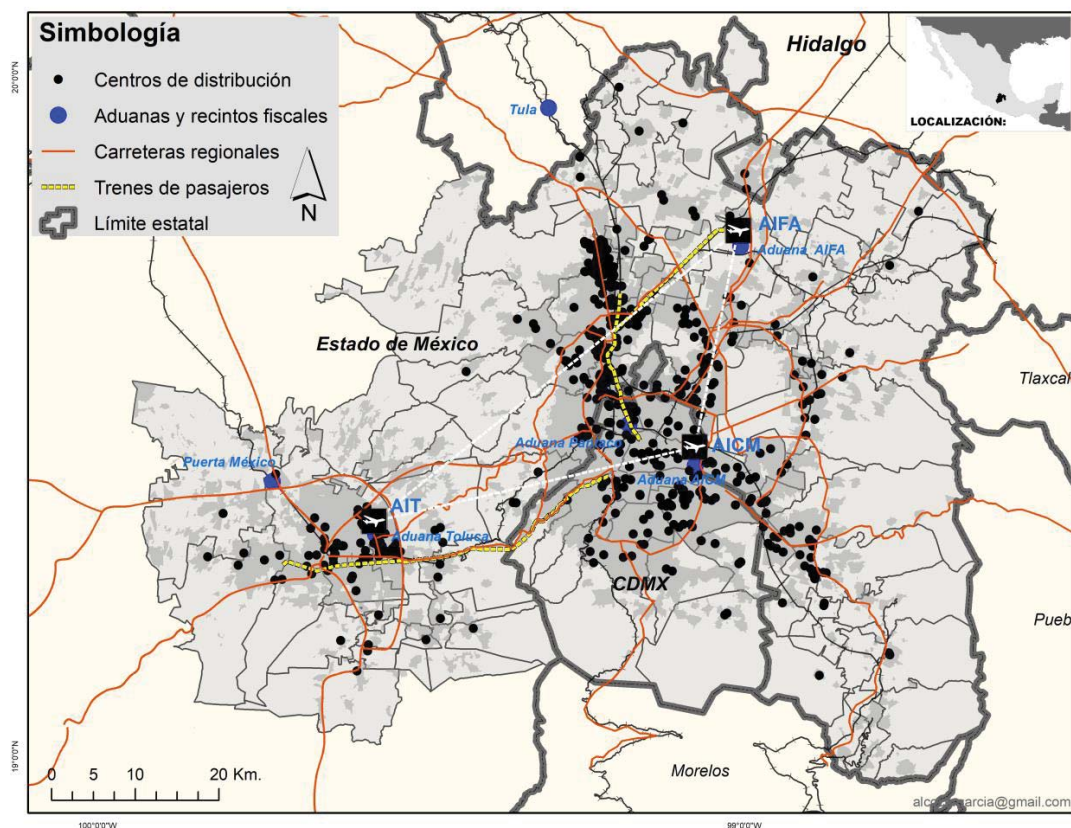


Figura 1. Centros de Distribución en la Gran Región Centro de México (GRCM).
Fuente: elaboración propia.

El análisis a nivel municipal arroja que los CEDIS operan en 71 municipios o alcaldías de las tres entidades que conforman la GRCM (Tabla 2). En siete de ellos se concentra poco más del 57 por ciento del total de la zona de estudio, que son: Cuautitlán Izcalli, el municipio con mayor número con 95 (13.3%), seguido de Tultitlán con 76 (10.7%), Tlalnepantla con 63 (8.8%), Tepetzotlán con 52 (7.3%), e Iztapalapa y Toluca con 41 (5.8%) para cada uno; además de Ecatepec con 39 (5.5%).

Tabla 2. Centros de Distribución por municipio en la Gran Región Centro de México (GRCM).

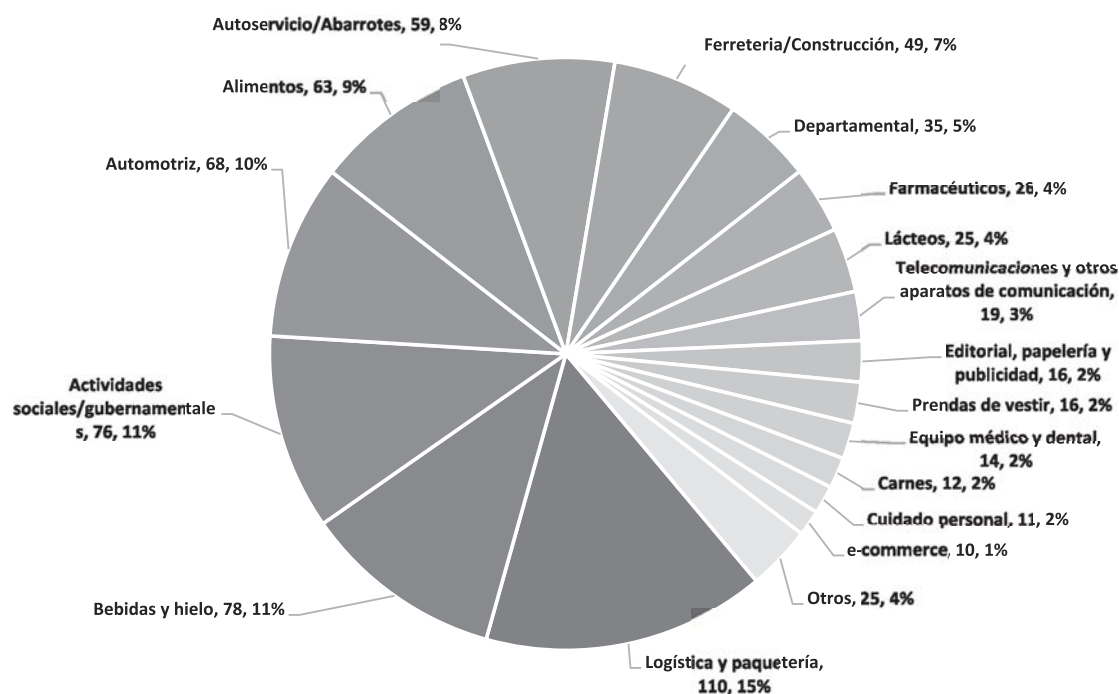
Municipio	CEDIS	% de participación en la GRCM	Empleos	% de participación en la GRCM
Cuautitlán Izcalli	95	13.3%	5,544	13.41%
Tultitlán	76	10.7%	4,614	11.16%
Tlalnepantla de Baz	63	8.8%	4,010	9.70%
Tepotztlán	52	7.3%	2,948	7.13%
Iztapalapa	41	5.8%	3,801	9.20%
Toluca	41	5.8%	2,036	4.93%
Ecatepec de Morelos	39	5.5%	2,037	4.93%
Azcapotzalco	29	4.1%	2,055	4.97%
Lerma	27	3.8%	1,875	4.54%
Cuautitlán	14	2.0%	1,453	3.52%
Atizapán de Zaragoza	13	1.8%	433	1.05%
Chalco	13	1.8%	785	1.90%
Nezahualcóyotl	13	1.8%	310	0.75%
Texcoco	12	1.7%	847	2.05%
Cuauhtémoc	11	1.5%	773	1.87%
Ixtapaluca	11	1.5%	682	1.65%
Benito Juárez	10	1.4%	230	0.56%
Naucalpan de Juárez	10	1.4%	381	0.92%
Gustavo A. Madero	8	1.1%	345	0.83%
Venustiano Carranza	8	1.1%	181	0.44%
Álvaro Obregón	7	1.0%	702	1.70%
Tláhuac	7	1.0%	100	0.24%
Tlalpan	7	1.0%	581	1.41%
La Paz	6	0.8%	641	1.55%
Metepec	6	0.8%	138	0.33%
Valle de Chalco Solidaridad	6	0.8%	35	0.08%
Zinacantepec	6	0.8%	301	0.73%
Coyoacán	5	0.7%	281	0.68%
Iztacalco	4	0.6%	537	1.30%
Miguel Hidalgo	4	0.6%	140	0.34%
41 municipios restantes que cuentan con CEDIS*	68	9.6%	2,539	6.14%
Total	712		41,335	

*Corresponde a: Nicolás Romero, Tecámac, Zumpango, Chimalhuacán, Huixquilucan, San Mateo Atenco, Almoloya de Juárez, Amecameca, Capulhuac, Chicoloapan, Coacalco de Berriozábal, Huehuetoca, Milpa Alta, Ocoyoacac, Temamatla, Teoloyucan, Tizayuca, Xochimilco, Acolman, Almoloya del Río, Apaxco, Atenco, Calimaya, Chapultepec, Chiautla, Chiconcuac, Hueypoxtla, Isidro Fabela, Juchitepec, La Magdalena Contreras, Nopaltepec, Otumba, Rayón, San Antonio la Isla, Tenango del Valle, Teotihuacán, Tepetlaoxtoc, Tequixquiac, Tezoyuca, Tultepec y Xalatlaco.

Fuente: elaboración propia.

4.3. Cedis por clase de actividad

Gran parte de los bienes e insumos que consume la región más poblada de México y de América Latina se proveen desde los 712 centros de distribución identificados. Estos, sí se estructura en grandes tipos de actividad, encontramos que predominan las actividades relacionadas con la logística y paquetería con 110 unidades (15.4%); de bebidas con 78 (11%); de actividades sociales o gubernamentales con 76 (10.7%); del sector automotriz con 68 (9.6%); de alimentos con 63 (8.8%) y de autoservicio y abarrotes con 59 (9.3%). El resto de estas actividades se puede observar en la gráfica siguiente.



Gráfica 1. CEDIS por principal tipo de actividad o producto en la Gran Región Centro de México (GRCM).

Fuente: elaboración propia.

Principales tipos de actividad de los centros de distribución

a) Logística y paquetería: ocupa el primer lugar con 110 CEDIS, de los cuales 95 se localizan en el Estado de México y 15 en la Ciudad de México. De los 95 en el Estado de México, 69 operan en los municipios de Cuautitlán Izcalli (27 el 28%), Tultitlán (23 el 24%) y Tepotzotlán (19 el 20%). En esta categoría destacan empresas como Tres Guerras, ESDO, Castores, Solistica TLC, Path Logistic, One Logistic, DHL, Estafeta, Almex, y Red Pack, entre otras.

b) Bebidas y relacionados: ocupa el segundo lugar con 78 centros, de los cuales 52 están en el Estado de México y 26 en la Ciudad de México. Las principales municipalidades en donde se instalan son Azcapotzalco, Ecatepec de Morelos y Toluca, con 7 (9%) CEDIS para cada uno de estos municipios. Las empresas más conocidas incluyen a: PepsiCo, Coca-Cola, Jugos del Valle, Bonafont, Embotelladora Pascual, Electropura y Jumex.

c) Actividades sociales y gubernamentales: se posiciona en tercer lugar con 76 unidades, de las cuales 74 (97%) se encuentran en el Estado de México y 2 (3%) en la Ciudad de México. Los principales municipios en donde se ubican son Ecatepec con 10 (13%), y Tlalnepantla y Toluca con 5 (7%) para cada uno. Estas instalaciones pertenecen a instancias públicas y contribuyen a la distribución de programas sociales.

d) Automotriz: ocupa el cuarto lugar con 68 centros; 41 (60%) operan en el Estado de México, 26 (38%) en la Ciudad de México y uno en Hidalgo. Los tres principales municipios o alcaldías en donde operan son Iztapalapa con 8 (12%), Ecatepec con 6 (9%) y Toluca con 4 (6%). Las principales empresas son Lucalza, NGK, Roshfrans, Ecom, Nikko, SyD, Refaccionarias California y Michelin.

e) Alimentos: ocupa el quinto lugar con 63 centros; 48 (76%) se localizan en el Estado de México y 15 (24%) en la Ciudad de México. Los municipios que tienen mayores registros son Tultitlán con 11 (17%), Tlalnepantla con 8 (13%) e Iztapalapa con 7 (11%). Las empresas principales son: Verde Valle, Sigma, McCormick, Alsea, Minsa, La Costeña, La Pastora, Nutriwell, Krispy Kreme, Sabormex, Toks, Bimbo, Bachoco y Mondelez.

f) Autoservicio y abarrotes: con 59 unidades, es la sexta categoría en la zona de estudio; 50 (84%) están en el Estado de México y 9 (16%) en la Ciudad de México. Operan principalmente en Cuautitlán Izcalli con 14 (24%) y Tultitlán con 10 (17%). Entre las empresas encontramos a: La Corona, Oxxo, Chedraui, Walmart, City Fresco, Tiendas Neto, Waldo's, Sam's Club, Tiendas 3B, Soriana, El Sardinero, Chedraui, Neto, Scorpion y Grupo Zorro.

4.4. Agrupación por unidades económicas

En la Gran Región Centro de México (GRCM), se identificaron dos principales agrupaciones por densidad de unidades económicas denominadas como Centros de Distribución (CEDIS) con un valor de concentración muy alto (*hh*) respecto al total de la megaregión. Estas agrupaciones se articulan alrededor de ejes estratégicos como la carretera que comunica a la Ciudad de México y Querétaro, las vías ferroviarias de carga que conectan la capital del país con el norte del país atravesando regiones y nodos carreteros que comunican con el Bajío y el norte de México.

A los clústeres identificados los denominamos como: A. Tepotzotlán, Cuautitlán Izcalli y Cuautitlán; y B. Tultitlán, Cuautitlán Izcalli y Tlalnepantla, ambas agrupaciones se localizan al norte de la capital mexicana, en municipios mexiquenses conurbados. Se caracterizan por tener accesibilidad vial directa a la autopista México–Querétaro y se ubican muy próximos a vías férreas de carga en operación, que conectan con la costa Este de los Estados Unidos y que continúa hasta Canadá. Estas vías de comunicación resultan esenciales para la conexión logística entre el centro de México y el norte del continente.

En conjunto, estas dos agrupaciones concentran 181 CEDIS, equivalentes al 25% del total de la GRCM, y generan 10 991 empleos, que representan el 26% del total de la zona de estudio (Figura 2 y 3 y Tabla 3).

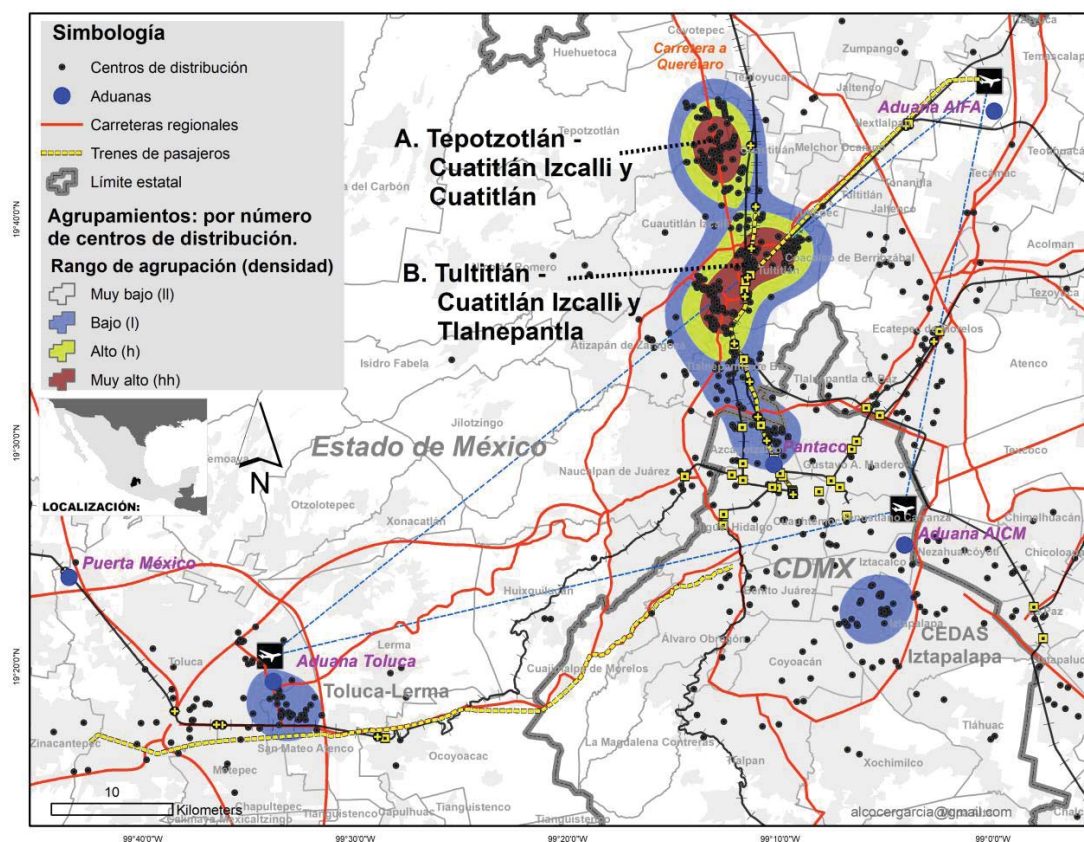


Figura 2. Mapa de densidad de centros de distribución en la Gran Región Centro de México (GRCM).

Fuente: elaboración propia.

A) Agrupación Tepotzotlán, Cuautitlán Izcalli y Cuautitlán

Esta agrupación se localiza al margen de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, siendo la más alejada sobre y hacia la salida a la ciudad de Querétaro. Agrupa 54 CEDIS y genera 3 379 empleos, lo que representa el 7.6% y 8.1%, respectivamente, del total de la GRCM. A nivel municipal se ubican 29 en Cuautitlán Izcalli (el 53%), 25 en Tepotzotlán (45%) y uno en Cuautitlán (2%) (Tabla 3).

Entre las empresas que operan en esta concentración destacan Alpura, Fresco, Herbalife, Amazon, Sigma Alimentos, LG, Bimbo, Transportes ESDO, Castores, Walmart, DHL, Novartis, Best Buy, Purina, Liverpool, Gamesa, Bodega Aurrera, entre otras.

Los CEDIS operan en 19 parques industriales, que representan el 12% de los 161 desarrollos industriales en la entidad, según datos de Fideicomiso para el Desarrollo de Parques y Zonas Industriales en el Estado de México (FIDEPAR, 2023). Estos parques industriales, algunos catalogados como logísticos, en su mayoría de reciente creación, han sido desarrollados por firmas inmobiliarias nacionales e internacionales especializadas, tales como TepozPark IV y V de Fibra Uno; El Trébol y El Convento I de Hines; CPA Logistic Center de CPA; El Carrizal, Tres Ríos y Park Cedros de Prologis, entre otros.

B) Agrupación Tultitlán, Cuautitlán Izcalli y Tlalnepantla

Esta segunda agrupación constituye el clúster logístico más relevante de la Gran Región Centro de México, integrando en los municipios de Tultitlán, Cuautitlán Izcalli y Tlalnepantla. En conjunto, concentra 127 CEDIS y 7 612 empleos, lo que representa el 17.8% y 18.4%, respectivamente, del total de la zona de estudio. El municipio de Tultitlán ocupa el primer lugar de CEDIS con 67 (53%), Tlalnepantla con 31 (24%) y Cuautitlán Izcalli con 29 (23%). Aquí, operan centros de distribución de empresas como Coppel, Andrea, Baxter, L'Oréal, City Club, Dixon, Soriana, Suburbia, Alsea, Walmart, Price Shoes, Office Max y Johnson y Johnson, entre otras.

Los almacenes de esta agrupación se localizan en 23 desarrollos industriales, equivalentes al 14% de los existentes en la entidad. La mayoría de los parques donde se ubican los centros de distribución, al igual que la de la agrupación “A. Tepetzotlán, Cuautitlán Izcalli y Cuautitlán”, fueron desarrollados por empresas inmobiliarias especializadas. Destacando los parques de San Martín Obispo, Tlalnepantla Park, Macrocentro Tultitlán, Park Cedros, Prologis Park, Prologis Agave Logistic Center, CPA Logistic Center Tlalnepantla, Mexiquense Park y Tultipark, entre otros.

En términos de conectividad, esta agrupación se localiza en una intersección estratégica a partir de la carretera México–Querétaro, la autopista Chamapa–Lechería y el Circuito Exterior Mexiquense, lo que le otorga acceso directo a la Ciudad de México, al Valle de Toluca, al Golfo de México mediante el enlace con el Arco Norte —incluyendo la zona del

Simbología

- Centros de distribución
- Agrupaciones por CEDIS
- Carreteras regionales
- Tren Suburbano
- Parques Industriales
- Limite estatal

LOCALIZACIÓN:

Map showing the distribution of centers (black dots) and industrial parks (yellow squares) in the Cuautitlán area. The map includes major roads (red lines) and the subway line (yellow dashed line). Key locations marked include Cuautitlán, Tultitlán, and the Cuautitlán Izcalli area. The map also shows the state boundary (thick grey line) and the location of the Cuautitlán area relative to Mexico City (CDMX).

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Resumen de agrupaciones por localización de unidades económicas (CEDIS).

Agrupación	Municipios	CEDIS	Empleos	Parques industriales	Principales parques industriales	Principales CEDIS que operan en la agrupación	Principales actividades	Eje de comunicación y de articulación principal
A. Cuautitlán Izcalli – Tepotzotlán y Cuautitlán	1. Cuautitlán Izcalli 2. Tepotzotlán 3. Cuautitlán	54	3,379 (62 empleos promedio por CEDIS).	19	• Centro Logístico Puente Grande • Cuautipark II • Evolution Park Tepotzotlán • Logistic Center Tepotzotlán • Cuautitlán OCPL • El Convento I • El Convento II • La Luz • Prologis Park Cedros • El Trébol • Tres Ríos • Microindustrial Cuautitlán Izcalli • Prologis Carrizal • Prologis Izcalli • Tepotzotlán Park • Tepozpark IV • Tepozpark V	Bimbo, Dawn Foods, Sigma, Roshfrans, Fresco, Bonafont, Jugos del Valle, Best Buy, LG, Amazon, Herbalife, Novartis, Alpura, DHL, Geodis, Ceva Logistics, GSL, Logisfashion, Mexflex, Nexa, Path Logistic, Stars Logistics, Castores, ESDO, Privalia, Todo Moda, La Madrileña, etc.	• Logística y paquetería	Carreteras: • México – Querétaro Vías ferroviarias: • Tren de carga concesionada a Ferrovial. • Tren de pasajeros El Suburbano.
B. Tultitlán – Cuautitlán Izcalli y Tlalnepantla	1. Tultitlán 2. Cuautitlán Izcalli 3. Tlalnepantla	127	7,612 (59 empleos promedio por CEDIS).	23	• CPA Logistic Center Tlalnepantla • Tlalnepark IV • Tlalne Park • Tlalnepark II • San Martín Obispo I y II • CPA Logistic Center San Martín Obispo • San Martín Obispo II • Tultipark I • Prologis Park Cedros (Álamos) • Macrocentro Tultitlán I • Tultipark II • Tultipark III • Cartagena • Mexiquense Park	Pak mail, Global Logistics, FedEx, DHL, Estafeta, Amerisa Logistics, Multilog Internacional. One Logistics, Solistica, Promologistics, Coppel, Ternium, L'Oréal, Petco, Altesa, Frialsa, City Club, Price Shoes, Verde Valle, Krispy Kreme, Alsea, Walmart, Soriana, Sam's Club, Suburbia, entre otros.	• Logística y paquetería • Alimentos • Autoservicio y Abarrotes	Carreteras: • México – Querétaro • López Portillo • Chamapa-Lechería • Circuito Exterior Mexiquense. Vías ferroviarias: • Tren de carga concesionada a Ferrovial. • Tren de pasajeros El Suburbano.
Totales		181	10,991	42				

Fuente: elaboración propia.

4.6. Agrupación por número de empleos

En cuanto al número de empleos, se identifican cuatro zonas con un alto valor de concentración (*hh*), las cuales se localizan dentro de las dos agrupaciones previamente identificadas como clústeres a partir de la densidad total de unidades económicas clasificadas como CEDIS (Figura 4 y 5 y Tabla 4).

Las agrupaciones se localizan en el Estado de México, alineadas a lo largo del eje carretero que comunica a la Ciudad de México con el estado de Querétaro, el cual junto con las vías ferroviarias de carga que corren en paralelo, constituye la principal puerta de entrada para mercancías hacia la capital del país.

Estas cuatro agrupaciones concentran 7,087 puestos de trabajo, equivalentes al 17% del total de la GRCM.

La agrupación (a) Cuautitlán Izcalli – Tepotzotlán es el clúster con mayor número de empleos y es el que se encuentra más alejado de la capital del país, ubicado sobre la salida hacia Querétaro. Reúne 34 unidades, lo que representa el 4.8% del total de CEDIS en la GRCM, entre las que se incluyen empresas como Bimbo, Dawn Foods, Fresco, Amazon, Nadro, Herbalife, Novartis, Alpura, DHL, ABC Logística, DSV Panalpina, GSL Logísticos, Hellmann, Logisfashion, Mexflex Logistics, Path Logistic Rivas, Purina, etc. Estas unidades generan 2 237 empleos, equivalentes al 5.4% del total de la zona de estudio, con un promedio de 65 empleos por CEDIS.

En cuanto a su distribución municipal, los CEDIS se localizan en dos municipios, concentrándose el 50% tanto para Tepotzotlán como para Cuautitlán Izcalli. Su actividad principal se orienta a los servicios de logística y paquetería. Operan en 11 parques industriales, entre los que destacan Prologis Park Cedros, Prologis Carrizal, El Convento I y II, CPA Logistic Center Tepotzotlán, Tepotzotlán Park, Cuautitlán OCPL y Tres Ríos.

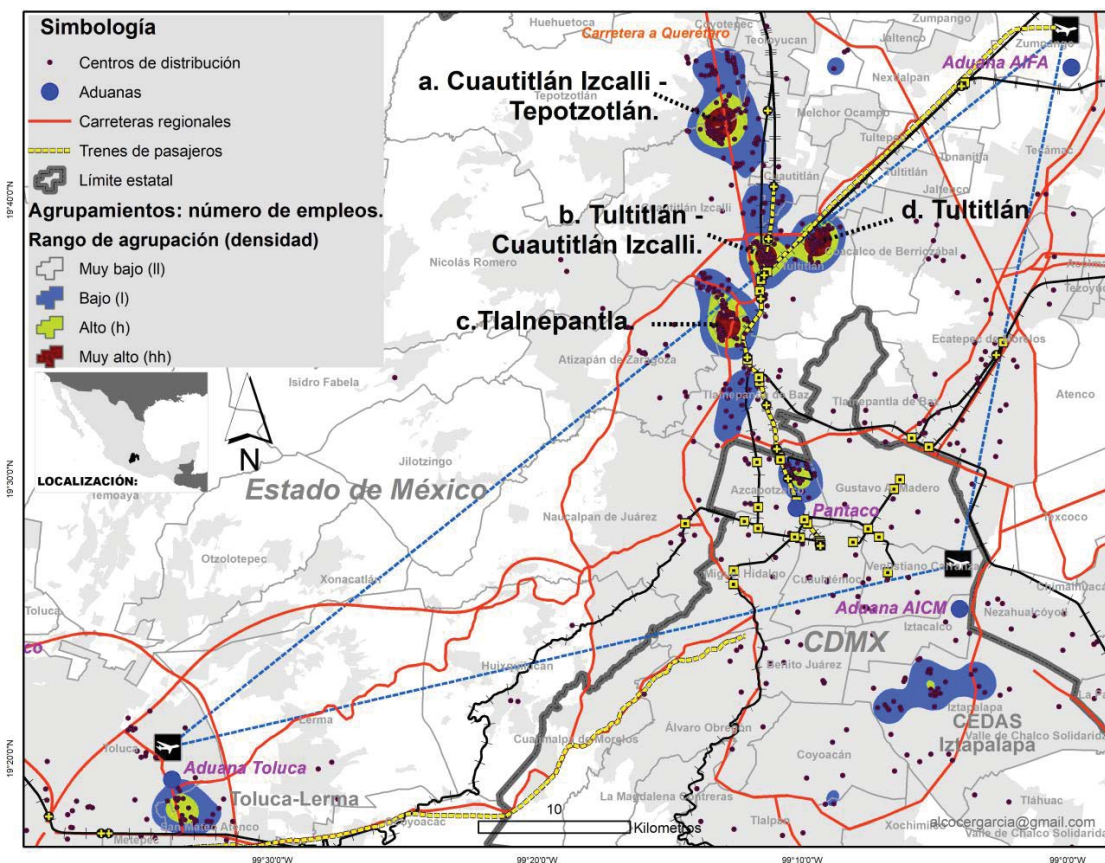


Figura 4. Mapa de densidad de empleos en centros de distribución en la Gran Región

Centro de México (GRCM).

Fuente: elaboración propia.

La agrupación (b) Tultitlán – Cuautitlán Izcalli se ubica en la intersección de la carretera México–Querétaro con la avenida José López Portillo y el Circuito Exterior Mexiquense. Representa el 3.4% de los CEDIS en la zona de estudio, entre los que se encuentran empresas como Clorox, Comercial Mexicana, Soriana, Woolworth, Suburbia, Samsonite, Dixon, Rheem, Zebrands, Sodimac, Aldisan, Logística TMX, Argo, Grupo ED, One Logistics, Sincronia, Price Shoes y Petco. Los CEDIS en esta agrupación generan 1 576 empleos,

equivalentes al 3.8% del total en la GRCM, siendo la agrupación con menor generación de empleo, con un promedio de 65 empleos por CEDIS.

Sus principales actividades corresponden a los sectores de autoservicio y abarrotes, departamental, así como de logística y paquetería. Operan en desarrollos como Prologis Cedros y Tultipark I, así como en las zonas industriales Independencia y Lechería–Cuautitlán. En cuanto a su distribución municipal, el 92% de los CEDIS se ubica en Tultitlán, mientras que el 8% restante se encuentra en Cuautitlán Izcalli.

En la concentración (c) Tlalnepantla operan 29 CEDIS, lo que representa el 4.1% de la GRCM. Entre las empresas que gestionan mercancías desde esta agrupación, se encuentran Alsea, Mead Johnson, Verde Valle, Ngk, Reckitt, Tiendas Extra, Nikken, Radio Shack, OfficeMax, Birmex, Schwabe Pharma, Philco, Pak mail, Estafeta, Gxo Logistics, Solistica, entre otras. Estas unidades generan 1 615 empleos, equivalentes al 3.9% del total identificado en la GRCM, con un promedio de 55 empleos por CEDIS.

En cuanto a su distribución municipal, el 28% de los CEDIS (8 unidades) se localiza en Cuautitlán Izcalli, mientras que el 72% restante (21 unidades) opera en Tlalnepantla. Sus principales actividades corresponden a los sectores de alimentos, autoservicio y abarrotes, así como logística y paquetería. Estas unidades se concentran en seis espacios industriales, entre los que destacan San Martín Obispo, Tlalne Park, CPA Logistic Center, Tlalnepark II y IV, y la zona industrial de Barrientos.

Finalmente, la aglomeración (d) Tultitlán, segunda en importancia por número de empleos, se localiza en el municipio del mismo nombre y constituye la agrupación situada más al este del eje carretero México–Querétaro. Presenta una accesibilidad estratégica, al sur mediante la vialidad José López Portillo y al norte a través del Circuito Exterior Mexiquense. Esta concentración integra 30 CEDIS, equivalentes al 4.2% del total en la GRCM, entre los que destacan Altesa, Bimbo, Krispy Kreme, Taco Holding, Frialsa, Scorpion, Tiendas 3B, Baxter, Wesco, Juguetron, DHL, A y R, Amerisa, Red Pack, OTD, Promologistics, Suma Logística, Tres Guerras, Andrea, Martí, etc. Estas unidades generan 1 659 empleos, lo que representa el 4% del total de la zona de estudio, con un promedio de 55 empleos por CEDIS.

Sus principales actividades corresponden a los sectores de logística y paquetería, así como de alimentos. Operan en tres espacios industriales, entre los que destacan Mexiquense Park, Tultipark II y Tultipark III.

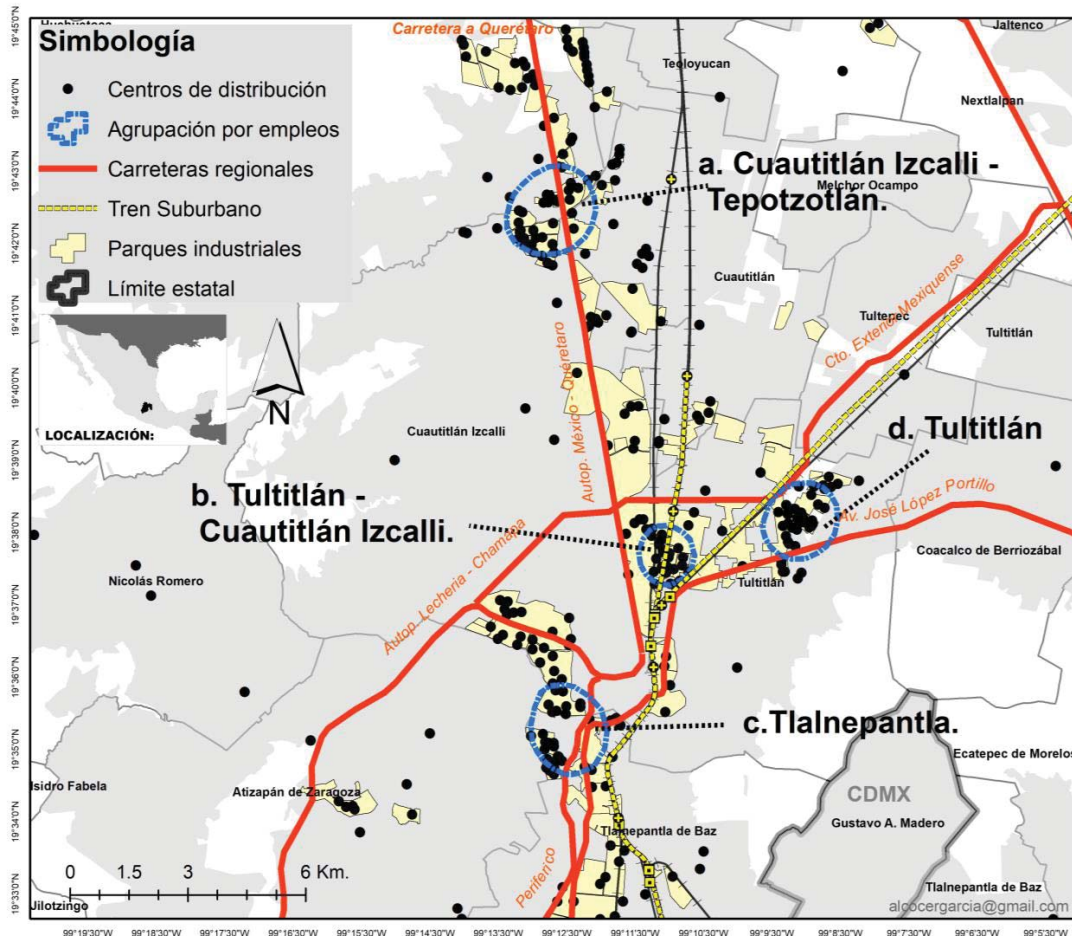


Figura 5. Agrupaciones por número de empleos en centros de distribución en la Gran Región Centro de México (GRCM).

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Resumen de agrupaciones por empleos en centros de distribución.

Agrupación	Municipios	CEDIS	Empleos	Parques industriales	Principales parques industriales	Algunos de los cedís que operan en la agrupación	Principales actividades	Eje de comunicación y de articulación principal
(a) Cuautitlán Izcalli – Tepotzotlán	1. Cuautitlán Izcalli 2. Tepotzotlán	34	2,237 (65 empleos promedio por CEDIS).	11	• CPA Logistic Center Tepotzotlán • Cuautitlán OCPL • El Convento I • El Convento II • Evolution Park Tepotzotlán • La Luz • Prologis Carrizal • Prologis Izcalli • Prologis Park Cedros • Tepotzotlán Park • Tres Ríos	Bimbo, Dawn Foods, Fresco, Amazon, Nadro, Herbalife, Novartis, Alpura, DHL, ABC Logística, DSV Panalpina, GSL Logísticos, Hellmann, Logisfashion, Mexflex Logistics, Path Logistic Rivas, Purina, etc.	• Logística y paquetería	Carreteras: • México – Querétaro. • Cuautitlán-Teoloyucan.
(b) Tultitlán – Cuautitlán Izcalli	1. Tultitlán 2. Cuautitlán Izcalli	24	1,576 (65 empleos promedio por CEDIS).	2	• Prologis Cedros • Tultipark I	Helm, Clorox, Comercial Mexicana, Soriana, Woolworth, Suburbia, Samsonite, Dixon, Rheem, Zebrands, Sodimac, Aldisan, Logística TMX, Argo, Grupo ED, One Logistics, Sincronía, Price Shoes y Petco.	• Logística y paquetería • Autoservicio y abarrotes • Departamental	Carreteras: • México - Querétaro • Av. José López Portillo. • Circuito Exterior Mexiquense. Vías ferroviarias: • Tren de carga concesionada a Ferrovial. • Tren de pasajeros El Suburbano
(c) Tlalnepantla	1. Tlalnepantla 2. Cuautitlán Izcalli	29	1,615 (55 empleos promedio por CEDIS).	6	• CPA Logistic Center Tlalnepantla • San Martín Obispo I y II • Tlalnepark II • Tlalnepark IV • Tultipark I	Alsea, Mead Johnson, Verde Valle, Ngk, Reckitt, Tiendas Extra, Nikken, Cantabria, Labs, Radio Shack, OfficeMax, Birmex, Schwabe Pharma, Philco, Pak mail, Estafeta, Gxo Logistics, Solística, etc.	• Logística y paquetería • Alimentos • Autoservicio y abarrotes	Carreteras: • Av. Periférico (se convierte en la carretera México – Querétaro). • Av. José López Portillo. Vías ferroviarias: • Tren de carga concesionada a Ferrovial. • Tren de pasajeros El Suburbano
(d) Tultitlán	1. Tultitlán	30	1,659 (55 empleos promedio por CEDIS)	3	• Mexiquense Park • Tultipark III • Tultipark II	Altesa, Bimbo, Krispy Kreme, Taco Holding, Frialsa, Scorpion, Tiendas 3B, Baxter, Wesco, Juguetron, DHL, A y R, Amerisa, Red pack, OTD, Promologistics, Suma Logística, Tres guerras, Andrea, Martí, etc.	• Logística y paquetería • Alimentos	Carreteras: • Av. José López Portillo. • Circuito Exterior Mexiquense. Vías ferroviarias: • Tren de carga concesionada a Ferrovial.
Totales		117	7,087	22				

Fuente: elaboración propia.

4.7. Agrupaciones históricas y emergentes

Por número de empleos existen tres zonas en donde el nivel de densidad es alto (*h*), dos de ellos se ubican en la Ciudad de México y uno en el Estado de México, teniendo a las siguientes zonas: *(i)* Central de Abastos (CEDAS) Iztapalapa; *(ii)* Pantaco-Vallejo; y, *(iii)* Toluca-Lerma (Figura 4).

Las zonas de la Central de Abastos Iztapalapa y la de Pantaco-Vallejo, son unos de los espacios de almacenaje y movimiento de mercancías más antiguos de la Ciudad de México y en general la zona de estudio. La primera, juega un papel clave para el manejo de comestibles perecederos en la GRCM, por su parte la de Pantaco-Vallejo está asociada al manejo de productos a través de transporte ferroviario con el norte del país y el continente en donde la aduana con el mismo nombre es clave en funcionamiento de dicha zona.

La zona *(i)* Central de Abastos (CEDAS) Iztapalapa integra al que se considera como el mercado más grande del mundo (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2015) y que por la naturaleza de los productos que maneja, generalmente perecederos como frutas y verduras, operan diversos espacios de almacenaje, pero como lo hemos citado anteriormente por la falta de un criterio de clasificación para el sector logístico y en particular de los CEDIS, muchos de estos no son considerados como tal, sino como bodegas, lo que limita el registro e integración en este estudio. En esta zona operan CEDIS de las empresas como Santa Maura, San José, Cedacan, Molinos Azteca, Maseca, Lactails, Novag, Sanborns, Al Super y el Zorro Abarrotero.

La zona *(ii)* Pantaco-Vallejo se puede considerar como el punto de inicio del corredor T-MEC (Moreno Codia et al., 2021), también representaba una de las zonas más industrializadas, y de conexión logística por ferrocarril, de la capital mexicana desde los años treinta hasta antes de los años noventa en donde se inicia un proceso de desindustrialización derivado por las regulaciones ambientales (Velázquez, 2014). Esta zona data 1929 con la asignación de predios para la integración de la zona industrial y que, en 1944, el presidente Manuel Ávila Camacho, a través de un Decreto Presidencial la estableció como la zona industrial de

Vallejo (Gobierno de la Ciudad de México, s/f). En esta zona coexisten centros de distribución e instalaciones de la industria manufacturera, entre algunas de las empresas que gestionan mercancías desde este punto podemos mencionar a EMSA, Tols, Maseca, La Comer, Sears, Lala, Casa de Toño, Impac, entre otras.

Por su parte, en el Valle de Toluca se identifica la zona (iii) *Toluca-Lerma*, localizada a los márgenes del corredor industrial Toluca-Lerma y articulada sobre el Paseo Tollocan (carretera México-Toluca), en torno a esta área se ubican importantes empresas como Bayer, Molino San Jorge, Barcel o Bimbo y las instalaciones del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de Toluca (AIT). Esta zona cuenta con una conectividad estratégica en torno a nodos de entronque con la autopista Toluca-Naucaupan, la México-Toluca, el Boulevard Aeropuerto y el libramiento Nororiente de la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca, este último enlaza hacia Atlacomulco, Valle de Bravo y Tenango del Valle. En esta zona operan CEDIS de empresas como Casa Cravioto, Waldos, Genomma Lab, Lala, Oxxo, Farmacias del Ahorro, Modatelas, Owens, Castores, Red Pack y Mercado Libre.

5. Discusión

Los resultados confirman que la localización de los Centros de Distribución (CEDIS) en la Gran Región Centro de México (GRCM) responde, en términos generales, a las tendencias identificadas en la literatura internacional (Warffemius, 2007; Onstein et al., 2020), particularmente aquellas que señalan la concentración en zonas periféricas con alta accesibilidad a redes de transporte multimodal (Tabla 5). La concentración de CEDIS en el Estado de México, especialmente en municipios al norte de la Ciudad de México y a lo largo del corredor México–Querétaro, evidencia la centralidad de este eje como articulador de los flujos logísticos entre la capital del país con el Bajío, el norte de México y que continúa hasta Estados Unidos y Canadá en el marco del T-MEC.

El patrón espacial identificado muestra un claro proceso de exurbanización (ubicación) de la actividad logística, donde los CEDIS tienden a ubicarse fuera de los límites urbanos de la Ciudad de México hacia municipios conurbados del Estado de México. Este proceso coincide con lo planteado por Hesse (2008) y Rodrigue (2004), quienes señalan que las actividades

logísticas buscan espacios con mayor disponibilidad de suelo, menores costos operativos y mejor conectividad. En este sentido, municipios como Cuautitlán Izcalli, Tultitlán, Tepotzotlán y Tlalnepantla se consolidan como las demarcaciones logísticas más importantes de la GRCM.

También, la coexistencia de agrupaciones históricas —como Pantaco-Vallejo o la Central de Abastos de Iztapalapa— en la GRCM refleja una reconfiguración espacial de la logística más que un reemplazo de los nodos tradicionales. Mientras los espacios históricos mantienen funciones vinculadas a productos y funciones específicas (alimentos perecederos, por ejemplo), los nuevos clústeres asumen un papel importante en la distribución de mercancías diversas y en mayor volumen.

Tabla 5. Generalidades asociadas a las agrupaciones de los centros de distribución en la Gran Región Centro de México (GRCM).

Tipos	Elementos	Descripción y/o ejemplos
Suelo	• Predios de gran superficie	Son predios que anteriormente eran mayoritariamente de uso agrícola y de mayores dimensiones en las zonas periurbanas o exurbanas, lo que facilita el trabajo de construcción de parques industriales y en consecuencia instalación de centros de distribución. Esto se demuestra, incluso más allá de GRCM, con la instalación de nuevos centros de distribución, como los de Costco y Sam's Club, en desarrollos industriales del estado de Hidalgo y sobre la carretera México-Querétaro.
	• Naves en espacios industriales	Los parques industriales se ubican principalmente en los márgenes de zona de estudio, en donde existe una mayor facilidad de comunicación y conectividad, así como de infraestructura y servicios especializados (seguridad, telecomunicaciones, etc.) que en estos desarrollos se otorgan.
Conectividad y accesibilidad	• Carreteras	Son ejes carreteros de importancia regional y nacional que comunican con otras regiones de México y con los países de Estados Unidos y Canadá. Por ejemplo, la autopista que comunica a la Ciudad de México con Querétaro, el Circuito Exterior Mexiquense y otras vías de importancia regional.
	• Infraestructura ferroviaria	La red ferroviaria de carga conecta la región con distintas zonas estratégicas del país, así como algunas de Estados Unidos y que continúa hasta Canadá. El Ferrocarril y Terminal del Valle de México S.A. de C.V. (Ferrovalle) funciona como eje articulador y punto de interconexión con diversas empresas ferroviarias de carga.
	• Transporte público	El Tren Suburbano de pasajeros comunica a la Ciudad de México, particularmente a las alcaldías Cuauhtémoc y Azcapotzalco, con los municipios del Estado de México como los de Tlalnepantla, Tultitlán, Cuautitlán Izcalli y Cuautitlán, facilitando la movilidad de trabajadores en el corredor México – Querétaro.
Mercado y fuerza laboral	• Proximidad al mercado	La GRCM, concentra a más de 24 millones de habitantes (SEDATU, CONAPO e INEGI, 2023), constituyéndose como uno de los mercados potenciales de consumo más grandes e importantes de América Latina.

Tipos	Elementos	Descripción y/o ejemplos
	• Fuerza laboral	Los municipios conurbados al norte de la Ciudad de México como Tlalnepantla, Tultitlán, Cuautitlán Izcalli, Tepotzotlán y Cuautitlán, según el Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS, 2024), a finales de 2024, concentraban más de 575 mil empleos formales, de los cuales más de 110 mil correspondían a actividades logísticas (transporte y telecomunicaciones). Esto equivale aproximadamente al 20% del total de empleos registrados en estos municipios antes citados.
Servicios estratégicos y complementarios	• Aduanas y recintos fiscalizados	Son esenciales en el comercio exterior, ya que regulan la entrada y salida de mercancías y ofrecen espacios especializados para manejo, almacenamiento y resguardo. En la región destaca la Terminal Pantaco, punto clave y de partida del corredor T-MEC que inicia en la Ciudad de México.
	• Infraestructura de telecomunicaciones	Las telecomunicaciones son fundamentales para la gestión de la cadena de suministro (inventarios, pedidos, rutas, proveedores y clientes). En el entorno de los clústeres logísticos se desarrolla infraestructura de interconexión digital que enlaza con el Norte de México, pasando por Querétaro, región líder en operación de centros de datos en México.

Fuente: elaboración propia.

6. Conclusiones

El análisis a escala megaregional de los CEDIS en la GRCM permitió identificar patrones de localización, concentración (agrupamientos) y especialización funcional. La investigación demuestra que los CEDIS no se distribuyen de manera aleatoria, sino que responden a condiciones territoriales específicas asociadas a la accesibilidad, la infraestructura de transporte y la proximidad a los principales mercados de consumo.

Uno de los principales hallazgos es la identificación de la concentración de los CEDIS en el Estado de México, particularmente en municipios conurbados al norte de la Ciudad de México y sobre el corredor México–Querétaro. Esta localización evidencia un proceso de reconfiguración de la infraestructura logística hacia zonas periféricas. Dicho proceso se inscribe en dinámicas globales observadas en otras regiones metropolitanas del mundo (Hesse, 2008; Rodrigue, 2004; Dablanç y Ross, 2012).

La identificación de clústeres mediante técnicas de análisis espacial, constituye una aportación metodológica viable para el estudio del sector. Estos agrupamientos concentran una proporción significativa de la actividad y el empleo logístico megaregional, lo que sugiere la presencia de economías de aglomeración y existencia de espacios especializados en la gestión de mercancías. Asimismo, se evidencia una estrecha relación entre la ubicación

de CEDIS y los parques industriales desarrollados por firmas inmobiliarias especializadas (como Prologis, Fibra Uno o Artha Capital).

No obstante, los resultados también ponen de manifiesto importantes vacíos institucionales y de política pública. A pesar de la relevancia económica y territorial de este tipo de elementos, no existe una estrategia pública de planeación que reconozca a estos espacios como infraestructura estratégica. Además, la falta de criterios de clasificación — en el SCIAN, por ejemplo— limita la comprensión del fenómeno a nivel nacional y dificulta la formulación de políticas orientadas a su regulación, articulación y fortalecimiento.

En este contexto, el estudio contribuye al análisis de la logística desde una perspectiva geográfica, aún poco explorada en el ámbito académico latinoamericano, y da paso a líneas de investigación futuras relacionadas con impactos territoriales, sociales y ambientales de la actividad logística. Asimismo, los resultados generan insumos que pueden apoyar el diseño de estrategias y políticas públicas orientadas a mejorar la competitividad logística de la GRCM.

7. Agradecimientos

Agradecemos a los dictaminadores por sus valiosos comentarios y aportes a esta investigación; así como a la licenciada Anel Díaz Albarrán por su apoyo en la elaboración de la cartografía, conformación de bases de datos y por sus pertinentes comentarios.

8. 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.

9. Referencias

- Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM). 2025. *Numeralia Aeroportuaria Ene. a Dic. 2024*. Recuperado de <https://www.aicm.com.mx/acercadelaicm/archivos/files/Estadisticas/EstadisticasDic2024.pdf>
- Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles (AIFA). 2024. *Numeralia Aeroportuaria Ene. a Dic. 2024*. <https://aifa-website.s3.us-east-1.amazonaws.com/contenido/RJPYE/Numeralia+Aeroportuaria+Ene.+a+Dic.+2024.pdf>
- Banco Mundial. (2018, 24 de julio). De las partes a los productos: por qué la logística comercial es importante. <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2018/07/24/from-parts-to-products-why-trade-logistics-matter>
- Bentazo Quezada, E. (1995). Hacia un sistema nacional de plataformas logísticas (Publicación técnica No. 64). Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Gobierno Federal. <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnicapt64.pdf>
- Dablanc, L., y Ross, C. (2012). Atlanta: A mega logistics center in the Piedmont Atlantic Megaregion (PAM). *Journal of Transport Geography*, 24, 432–442. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.05.001>
- Dewar, M., y Epstein, D. (2007). Planning for “megaregions” in the United States. *Journal of Planning Literature*, 22(2), 108–124. <https://doi.org/10.1177/0885412207306615>
- Fideicomiso para el Desarrollo de Parques y Zonas Industriales en el Estado de México (FIDEPAR). (2023). Mapa interactivo [Sitio web]. <https://fideparmapainteractivo.edomex.gob.mx/fidepar/#/mapainteractivo>
- Fideicomiso para el Desarrollo de Parques y Zonas Industriales en el Estado de México (FIDEPAR). (2023). Directorio de parques industriales. Secretaría de Desarrollo Económico del Estado de México. https://fidepar.edomex.gob.mx/desarrollos_industriales

Gobierno de la Ciudad de México. (s.f.). *Vallejo-I. Plataforma de innovación e industria*. <https://vallejo-i.cdmx.gob.mx/>

Gobierno de México, Secretaría de Salud. (28 de febrero de 2020). *Se confirma en México caso importado de coronavirus COVID-19* [Comunicado de prensa]. <https://www.gob.mx/salud/prensa/077-se-confirma-en-mexico-caso-importado-de-coronavirus-covid-19>

Gobierno de México. (2015). *La Central de Abasto: el mercado más grande del mundo*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/la-central-de-abasto-el-mercado-mas-grande-del-mundo?idiom=es>

Gobierno del Estado de México. (2023, 18 de julio). *Conferencia sobre avances del Tren Interurbano México-Toluca con Alfredo del Mazo* [Archivo de video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=O_sDyDpMI_c

Hesse, M. (2008). *The City as a Terminal: The Urban Context of Logistics and Freight Transport*. Ashgate.

Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS). 2020a. *Patrones afiliados al IMSS*. Recuperado de <https://public.tableau.com/app/profile/imss.cpe/viz/TAPatrones/Patrones>

Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS). 2020b. Registro histórico de empleados afiliados al IMSS. https://public.tableau.com/app/profile/imss.cpe/viz/Historico_4/Empleo_h

Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS). 2024. *Registro histórico de empleados afiliados al IMSS*. https://public.tableau.com/app/profile/imss.cpe/viz/TAempleoysalario_0/EmpleoySalario

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2023). Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE). <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Producto Interno Bruto por Entidad Federativa (PIBE) 2022. Año base 2018 (cifras revisadas). INEGI. 2022. <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/PIBEF/PIBEF2022.pdf>

- Kasilingam, R. G. 1998. *Logistics and Transportation: Design and Planning*. Springer Science+Business Media Dordrecht.
- Lagunes, H. (2020). Aeropuerto Internacional de Toluca, ¿potencial desaprovechado? En El Aire. <https://enelaire.mx/aeropuerto-internacional-de-toluca-potencial-desaprovechado/>
- Lynagh, P. M. (1971). Measuring distribution center effectiveness. *Transportation Journal*, Invierno, 21–33. American Society of Transportation y Logistics, Inc.
- Moreno Blat, J. M., Boronio Luna, M. del C., Escobedo Pérez, N., Meza Rodríguez, N., y Pacheco Madrigal, R. I. (2018). *Mapa de Ruta Nacional de Logística*. Secretaría de Economía, ProMéxico.
<http://www.elogistica.economia.gob.mx/work/models/elogistica/Resource/3/1/images/Mapa%20de%20Ruta%20Nacional%20de%20Logistica.pdf>
- Moreno Codina, T., de la Barrera Medina, M. S., y García Jaimes, C. (2021). Geografía Regional del Eje Interior del Pacífico. En P. Wong González, J. E. Isaac Egurrola, E. R. Morales García de Alba, y A. Treviño Aldape (Coords.), *La dimensión global de las regiones y sus reconfiguraciones económicas y urbanas* (Vol. II). Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM.
<https://ru.iiec.unam.mx/5482/>
- Onstein, A. T. C., Tavasszy, L. A., Rezaei, J., Van Damme, D. A., y Heitz, A. (2020). A sectoral perspective on distribution structure design. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 25(6), 1011–1039. <https://doi.org/10.1080/13675567.2020.1849074>
- Regional Plan Association. (2002). *America 2050: A Prospectus*. <https://rpa.org/work/reports/america-2050-prospectus>
- Rodrigue, J.P. (2004). Freight, gateways and mega-urban regions: The logistical integration of the Bostwash corridor. *Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie*, 95(2), 147–161. <https://doi.org/10.1111/j.0040-747X.2004.t01-1-00297.x>
- Romo Viramontes, R. y Velázquez Isidro, M. (2019). La dinámica inter e intrametropolitana de migración y movilidad entre la Zona Metropolitana del Valle de México y zonas metropolitanas

vecinas. Instituto de Investigaciones Jurídicas, UNAM.
<https://archivos.juridicas.unam.mx/www/bjv/libros/11/5392/4.pdf>

Ross, C. L., Barringer, J., y Yang, J. (2008). *Megaregions: Literature review of the implications for U.S. infrastructure investment and transportation planning*. Georgia Institute of Technology, Center for Quality Growth and Regional Development; United States Federal Highway Administration, Office of Planning. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/50811>

SEDATU, CONAPO e INEGI. (2023). *Metrópolis de México 2020*. Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano. <https://www.gob.mx/sedatu/documentos/metropolis-de-mexico-2020?state=published>

Silverman, B. W. (1998). *Density estimation for statistics and data analysis*. Monographs on Statistics and Applied Probability. School of Mathematics, University of Bath, Reino Unido: Chapman y Hall. https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781351456173_A36334477/preview-9781351456173_A36334477.pdf

Velázquez, J. B. (2014). *Reconversión de la zona ex-industrial Ferrería-Vallejo a nuevos usos "corporativo"*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México. <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000709040>

Warffemius, P. M. J. (2007). *Modeling the clustering of distribution centers around Amsterdam Airport Schiphol: Location endowments, economies of agglomeration, locked-in logistics and policy implications*. Tesis doctoral, Erasmus University Rotterdam, Erasmus University Rotterdam. <https://repub.eur.nl/pub/10531/Proefschrift%20Warffemius.pdf>

Wheeler, S. (2009). Regions, Megaregions, and Sustainability. *Regional Studies*, 43(6), 863–876. <https://doi.org/10.1080/00343400701861344>

Análisis de la calidad del agua de manantial: caso de estudio en el Estado de México

Analysis of Spring Water Quality: A Case Study in the State of Mexico

Ana Elisa Alcántara Valladolid¹, Juan Manuel Esquivel Martínez^{2*}, Carolina Alvarez Bastida³, Carlos Roberto Fonseca Ortiz¹, José Alfredo Flores Ronces⁴

¹Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) de la Universidad Autónoma del Estado de México, Carretera Toluca-Atlacomulco, km 14.5, Toluca, México, C.P. 50295. aelcantarav@uaemex.mx, crfonsecao@uaemex.mx, <https://orcid.org/0000-0002-5677-0739>, <https://orcid.org/0000-0002-3377-6564>

²Secihti - Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) de la Universidad Autónoma del Estado de México, Carretera Toluca-Atlacomulco, km 14.5, Toluca, México, C.P. 50295. jmesquivel@secihti.mx, <https://orcid.org/0000-0003-1864-4501>

³Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México, Cerro Coatepec s/n Ciudad Universitaria, Toluca de Lerdo, México, C.P. 50110. calvarezb@uaemex.mx, <https://orcid.org/0000-0002-4041-8124>

⁴Facultad de Ecología Marina de la Universidad Autónoma de Guerrero, Gran Vía Tropical 20, Las Playas, Acapulco de Juárez, C.P. 39390. ron_alf23@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0186-4743>

*Autor(a) de Correspondencia

Recibido: 18/09/2025. Aceptado: 25/11/2026. Publicado: 05/02/2026.

Cómo citar este artículo: Alcántara Valladolid, A. E., Esquivel Martínez, J. M., Alvarez Bastida, C., Fonseca Ortiz, C. R. y Flores Ronces, J. A. (2026). Análisis de la calidad del agua de manantial: caso de estudio en el Estado de México. *Geografía Aplicada*, 2(1), 112-135.

Resumen

Los manantiales desempeñan un papel fundamental en el abastecimiento de agua para comunidades urbanas y rurales, además son clave para la conservación y el uso sostenible de los cuerpos y ecosistemas acuáticos. El objetivo de este estudio fue analizar la calidad del agua de manantial utilizada por la población tanto para el consumo humano como para actividades domésticas, con el fin de promover su uso sostenible en una zona cercana a la cabecera municipal de Almoloya de Juárez, Estado de México. La calidad del agua del manantial se estableció mediante la determinación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en dos manantiales ubicados en el área de estudio (ojo de agua y cabecera). Las determinaciones se realizaron conforme a los procedimientos establecidos por la normatividad oficial mexicana y se consideró los siguientes parámetros: pH, sólidos totales (ST), sólidos disueltos totales (SDT), sólidos suspendidos totales (SST), turbidez, color, conductividad eléctrica, dureza total, alcalinidad total, cloruros (Cl^-), sulfatos (SO_4^{2-}), nitratos (N-NO_3^-), nitritos (N-NO_2^-), fosfatos (PO_4^{3-}), coliformes fecales (CF) y coliformes totales (CT). La interpretación se realizó con base en la Norma NOM-127-SSA1-2021, la cual establece los límites máximos permisibles para el uso y consumo humano. El único parámetro que excedió los límites fue el de coliformes totales en ambas fuentes de abastecimiento, mientras que el resto se mantuvo dentro de los rangos permitidos. Finalmente, la investigación ofrece información valiosa sobre la calidad del agua de manantial.

Palabras clave: calidad del agua, manantial, agua de consumo humano.

Abstract

Springs play a fundamental role in providing water to urban and rural communities and are key to the conservation and sustainable use of aquatic bodies and ecosystems. The objective of this study was to analyze the quality of spring water used by the population for both human consumption and domestic activities, with the goal of promoting its sustainable use in an area near the municipal seat of Almoloya de Juárez, State of Mexico. The quality of the spring water was established by measuring physicochemical and microbiological parameters in two springs located in the study area (ojo de agua and cabecera). The determinations were carried out in accordance with the procedures established by Mexican official regulations and the following parameters were considered: pH, total solids (TS), total dissolved solids (TDS), total suspended solids (TSS), turbidity, color, electrical conductivity, total hardness, total alkalinity, chlorides (Cl^-), sulfates (SO_4^{2-}), nitrates (N-NO_3^-), nitrites (N-NO_2^-), phosphates (PO_4^{3-}), fecal coliforms (CF) and total coliforms (CT). The interpretation was based on Standard NOM-127-SSA1-2021, which establishes the maximum permissible limits for human use and consumption. The only parameter that exceeded the limits was total coliforms in both supply sources, while the rest remained within the permitted ranges. Finally, the research offers valuable information on the quality of the spring water.

Keywords: water quality, spring, drinking water

1. Introducción

Los manantiales de agua dulce se distribuyen ampliamente en los territorios y suministran agua vital para fines de consumo humano, doméstico, agrícola e industrial, personas en todo el mundo, especialmente a los territorios rurales; además, el agua de manantial es considerada un recurso primordial para el desarrollo sostenible (Cantú, 2025; Colín *et al.*, 2025; Bhat *et al.*, 2022; Moldavan *et al.*, 2020). Ante este escenario y de acuerdo con el Objetivo 6 de Desarrollo Sostenible (ODS) es necesario analizar fuentes de agua consideradas esenciales para el abastecimiento humano, con el fin de garantizar la

disponibilidad y acceso al agua de consumo humano, el saneamiento, y gestión sostenible del recurso para la población hacia el 2030 (Prince y Espinoza, 2021).

Los manantiales cumplen con una función importante para el consumo humano, preservación de ecosistemas, así como ciclo hidrológico (López *et al.*, 2016; Rosca *et al.*, 2020). Sin embargo, la calidad del agua en los manantiales se ve amenazada por factores como: el uso intensivo, el cambio climático, y mayormente por contaminación antropogénica (proliferación de innumerables focos de contaminación) y mínimamente por contaminación natural (fuentes geogénicas y calidad del agua de recarga) (Davraz y Batur, 2021; Rosca *et al.*, 2020). Por lo tanto, conocer las características hidrogeoquímicas del agua de manantial es vital para la determinación de su uso y la gestión adecuada.

Ante la posible contaminación del agua de manantial, los ecosistemas acuáticos podrían estar en peligro y la población de las zonas rurales es más propensa a consumir agua no segura, lo que podría reflejar un impacto negativo en la salud humana a través de enfermedades hídricas como: diarrea, colera, salmonelosis, disentería, fiebre tifoidea, abortos espontáneos, síndrome del niño azul o metahemoglobinemia, cáncer, fluorosis dental y esquelética, osteoporosis, problemas de la glándula tiroides, enfermedades cardiovasculares, renales y pulmonares (Ather *et al.*, 2022; El Mountassir *et al.*, 2022).

De acuerdo con Núñez (2024), la contaminación del agua en México se considera un problema grave causado por descargas urbanas, industriales y agrícolas, sin tratamiento previo debido a escasas plantas de tratamiento de aguas residuales en operación. Ante este escenario, cuando las aguas superficiales son insuficientes o están muy contaminadas, el agua subterránea se convierte en la principal fuente de abastecimiento en muchas áreas urbanas y rurales, y en algunos casos puede ser la única fuente de abastecimiento.

En la última década se han presentado incrementos y decrementos en relación con los volúmenes concesionados para los usos consuntivos. En México, el 60.1% del agua de uso

y consumo se abastece de fuentes superficiales y el 39.9% corresponde a fuentes subterráneas. Ante este escenario, en 2022, en relación con el uso de fuentes subterráneas, agrícola y abastecimiento público representaban el 92% del volumen concesionado a nivel nacional (CONAGUA-SEMARNAT, 2024). Por tal motivo, disponer de agua subterránea en cantidad y calidad suficiente para la población se vuelve un tema necesario, ya que es un recurso esencial utilizado para el consumo humano y uso doméstico (Gobierno de México, 2025). Además, el estado de su calidad puede incidir positiva o negativamente en la salud del ser humano.

El agua subterránea puede ser obtenida a través de pozos, norias y manantiales. En diversos territorios del Estado de México se utiliza el agua de manantial debido a su excelente calidad y fácil acceso. El objetivo fue analizar la calidad del agua de manantial con vista a facilitar su uso sostenible, considerando como caso de estudio a dos manantiales situados en las cercanías del municipio de Almoloya de Juárez, México.

2. Metodología

El estudio de calidad de agua en manantiales es fundamental para garantizar el uso adecuado, minimizando las posibles consecuencias en su uso y consumo humano. En la tabla 1, se presentan los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y su método correspondiente avalado por la norma NMX-AA-116-SCFI-2001 (DOF,2001). En la tabla 1, se presenta el proceso metodológico utilizado para la determinación de cada parámetro.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua.

Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos	Norma mexicana/método
Acidez	NMX-AA-036-SCFI-2001
Alcalinidad	
Cloruros (Cl ⁻)	NMX-AA-073-SCFI-2011
Color	NMX-AA-045-SCFI-2021
Conductividad Eléctrica (CE)	NMX-AA-093-SCFI-2000
Coliformes Totales (CT)	NMX-AA-42-1987
Coliformes Fecales (CF)	
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	Ion selectivo

Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Método HACH
Dureza Total	NMX-AA-072-SCFI-2001
Fluoruros (F ⁻)	Ion selectivo
Fosfatos (PO ₄ ³⁻)	NMX-AA-029-SCFI-2001
Metales (Na, Mg, K, Cu, Fe, Zn, Cr, Pb)	NMX-AA-051-SCFI-2001
Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	Ion selectivo
Nitritos (N-NO ₂ ⁻)	NMX-AA-079-SCFI-2001
Nitrógeno amoniacal (N-NH ₃ ⁻)	Ion selectivo
Oxígeno Disuelto (OD)	Método HACH
pH	NMX-AA-008-SCFI-2000
Sólidos Disueltos Totales (SDT) Sólidos Suspendidos Totales (SST) Sólidos Totales (STT)	NMX-AA-034-SCFI-2015
Sólidos Sedimentables	NMX-AA-004-SCFI-2000
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	NMX-AA-039-SCFI-2001
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	NMX-AA-074-SCFI-1981
Temperatura	NMX-AA-007-SCFI-2000
Turbidez	NMX-AA-038-SCFI-2001

Fuente: elaboración propia a partir de consultar diversas normas mexicanas (DOF, 2021).

2.1. Área de estudio

El área de estudio se localiza de manera próxima a la cabecera municipal del municipio de Almoloya de Juárez, Estado de México (Figura 1). Esta ocupa una superficie aproximada de 9.7 km². El municipio de Almoloya de Juárez tiene innumerables manantiales, por ello los habitantes dependen del agua de estos cuerpos de agua para el consumo humano y actividades domésticas. En el área de estudio se analizaron dos manantiales de tipo fríos (ojo de agua y cabecera) cuyas características se presentan en la tabla 2.

El manantial Ojo de Agua es el más relevante del municipio debido a la presencia del fenómeno de la “raya del agua”, asociado al efecto Marangoni (Wissink y Herlina, 2023), y a su papel en el abastecimiento de seis comunidades. Las comunidades que utilizan el agua del manantial Ojo de Agua son: Barrio la Cabecera primera sección, la Cabecera, la Cabecera tercera sección, Barrio de San Pedro, San Mateo Tlalchichilpan y Villa Almoloya de Juárez (Figura 1). Por otro lado, el manantial la Cabecera se utiliza como fuente alterna al manantial

ojo de agua, sobre todo cuando se presentan fallas eléctricas, fallas mecánicas, mayor demanda de recurso y por falta de recursos económicos.

Tabla 2. Coordenadas de los manantiales.

ID	Manantial	UTM X (m)	UTM Y (m)	Altitud (msnm)
1	Ojo de Agua	420235	2141142	2602
2	Cabecera	421320	2140060	2637

Fuente: elaboración propia (trabajo de campo).

El área de estudio se localiza dentro de la faja volcánica Transmexicana. En esta sobresalen tres unidades estratigráficas recientes del periodo Cuaternario con épocas del Pleistoceno al holoceno. A continuación, se presenta la descripción detallada de las formaciones (IFOMEGEM, 1994; Esquivel, 2015):

- Qal (aluvión): se caracteriza por la presencia de arena, limo y grava con interestratificación de ceniza volcánica, resultado de la actividad volcánica. Esta se localiza al noroeste del área de estudio y sobresale el manantial ID1.
- Qhv (derrames de lava): principalmente son de composición basáltica, dacítica y andesítica, con deposición de cineríticos además de rocas piroclásticas. Esta sobresale en la parte sur del área de estudio y en esta formación emana el manantial ID2.
- Qpla (sedimentos lacustres): incluyen una serie de conglomerados y rocas areniscas, así como limolitas semiconsolidadas, con interestratificaciones de capas de toba, pómez y diatomitas. Se puede observar esta formación en la parte noroeste.

Hidrogeológicamente, el espacio analizado se localiza en la porción noroeste del acuífero del Valle de Toluca (AVT) y se caracteriza por ser un área donde ocurre simultáneamente recarga y descarga del agua subterránea a través de manantiales. En el área de estudio se identifican dos tipos de unidades acuíferas: 1) unidad porosa (funciona como un acuífero libre) compuesta por depósitos de relleno clásticos no consolidados que rellenan el Valle de Toluca y en las estribaciones montañosa, además yace sobre unas tobas de baja permeabilidad (acuitardo) y 2) la unidad fracturada (funciona hidráulicamente como

acuífero confinado o semiconfinado) se localiza debajo de la unidad porosa y se relaciona con rocas volcánicas afectadas por tectonismo y con permeabilidad secundaria por fracturamiento (CONAGUA, 2024; Esquivel, 2022).

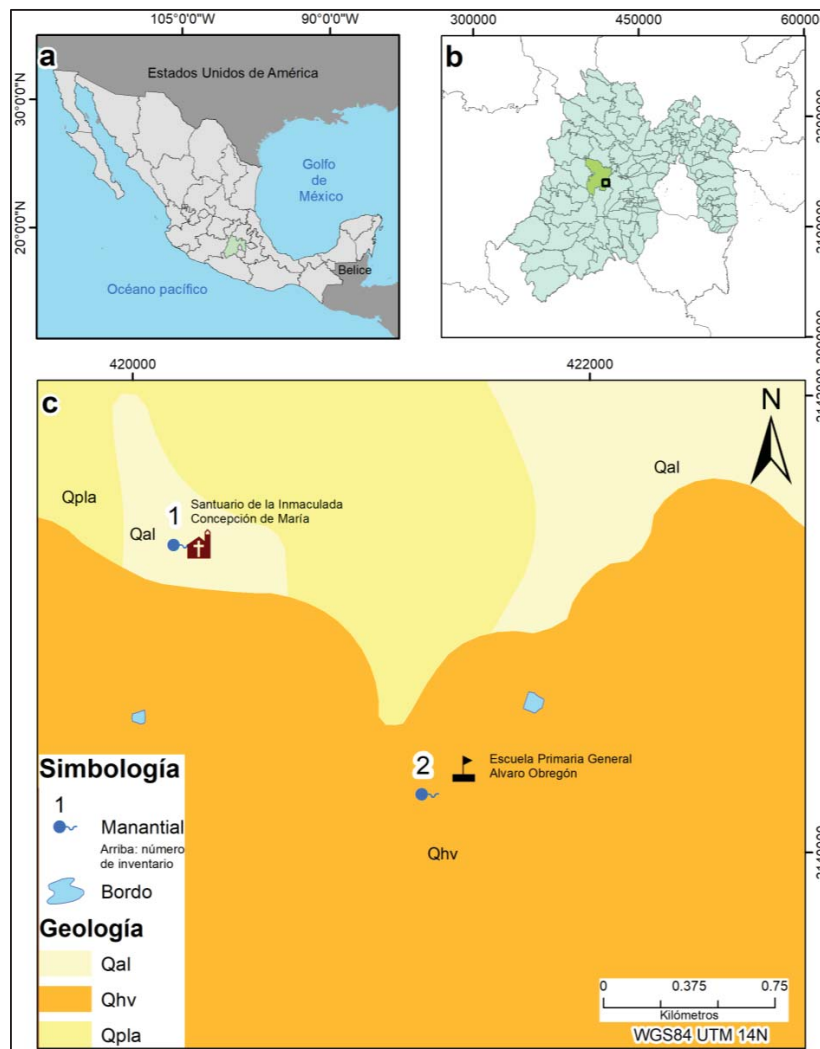


Figura 1. (a) Mapa de la ubicación geográfica, (b) Estado de México y municipio de Almoloya de Juárez, y (c) Geología y ubicación de los manantiales.

Fuente: elaboración propia con base en el marco geoestadístico del INEGI (2024) e IFOMEGEM (1994).

La unidad porosa está integrada por Qal (depósitos aluviales) y Qpla (depósitos lacustres), las cuales presentan poca de permeabilidad, lo que limita su aprovechamiento en la explotación del agua subterránea. Por el contrario, la unidad fracturada presenta una permeabilidad elevada y se conforma por Qhv (derrames de lava de composición basáltica y andesítica) considerada área de descarga en zonas bajas a través de manantiales (CNA, 2002b). Los manantiales analizados en este estudio emanan en el contacto entre las rocas más fracturadas del basalto con el basalto menos fracturado (Esquivel, 2008).

2.2. Materiales y métodos

2.2.1. Muestreo y técnicas de medición

En el año 2023 se llevó a cabo una única campaña de muestreo en dos manantiales seleccionados: el manantial Ojo de Agua y el manantial cabecera. En cada manantial se determinaron parámetros *in situ*: pH, temperatura y conductividad eléctrica, mediante un equipo multiparamétrico marca HANNA (HI 9126) previamente calibrado. Posteriormente, se recolectaron muestras para la determinación en laboratorio de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos (Figura 2), los cuales fueron: turbidez, color, sólidos totales (ST), sólidos disueltos totales (SDT), sólidos suspendidos (SS), alcalinidad, acidez, demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), dureza total (DT), cloruros (Cl⁻), nitratos (N-NO₃⁻), nitritos (N-NO₂⁻), nitrógeno amoniacal (N-NH₃⁻), fosfatos (PO₄³⁻), sulfatos (SO₄²⁻), sustancias activas al azul de metileno (SAAM). Además, se determinaron microbiológicos: coliformes fecales (CF) y coliformes totales (CT), considerando los protocolos de preservación y toma de muestra basados en la normatividad mexicana NOM-014-SSA1-1993 (DOF, 1993), para cada uno de los parámetros y su posterior análisis en el laboratorio.

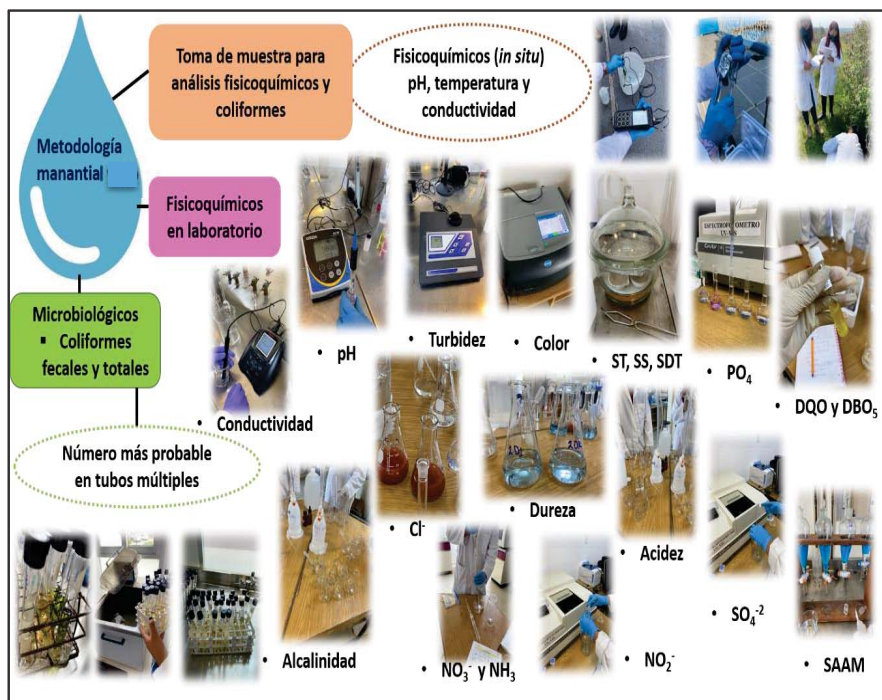


Figura 2. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

Fuente: elaboración propia.

2.2.2. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos

Los análisis fisicoquímicos y microbiológicos se realizaron en el Laboratorio de Calidad del Agua del Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA), basados en la NOM-127-SSA1-2021 (DOF, 2021), que establece los límites máximos permisibles de los distintos parámetros para uso y consumo humano.

En laboratorio se realizó la caracterización de los parámetros, pH mediante el potenciómetro marca OAKTON modelo ION 700, conductividad eléctrica con un conductímetro marca Thermo Scientific modelo ORION STAR 212, la turbidez se determinó mediante un turbidímetro marca Scientific, Inc. modelo micro 100 turbidimeter, previamente calibrados con estándares de 0.2, 10 y 1000 UNT.

Los sólidos totales (ST), suspendidos (SS) y disueltos totales (SDT) fueron determinados en capsulas y crisoles de porcelana por métodos gravimétricos como marca la norma NMX-AA-034-SCFI-2015 (DOF, 2016a), por evaporación de la muestra en horno de calentamiento a temperatura de 105°C durante 3 h a sequedad.

La alcalinidad y acidez se analizaron de acuerdo con el procedimiento que marca la norma NMX-AA-036-SCFI-2001, dureza con la NMX-AA-072-SCFI-2001 y cloruros con la NMX-AA-073-SCFI-2001 mediante métodos volumétricos, la alcalinidad se determinó dentro de las primeras horas posteriores al muestreo utilizando H_2SO_4 , 0.02 N como titulante y fenolftaleína, verde de bromocresol y naranja de metilo como indicadores colorimétricos. Para la dureza se utilizó solución EDTA para titular, mientras que la acidez fue analizada mediante NaOH como titulante y fenolftaleína como indicador colorimétrico. Los cloruros (Cl^-), se analizaron utilizando nitrato de plata y como indicador colorímetro cromato de potasio según la NMX-AA-017-1985 (DOF, 2021).

A continuación, se enlistan los procedimientos colorimétricos empleados en la determinación de parámetros: demanda química de oxígeno (DQO), nitratos (N-NO_3^-), nitrógeno amoniacal (N-NH_3^-) se determinaron por método HACH avalado por la NMX-AA-116-SCFI-2001. La demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) por electrodo y soportado con la NMX-AA-116-SCFI-2001, nitritos (N-NO_2^-) mediante la NMX-AA-099-SCFI-2021, fosfatos (PO_4^{3-}) mediante la norma NMX-AA-029-SCFI-2001, sulfatos (SO_4^{2-}) con la NMX-AA-074-SCFI-2014 y sustancias activas al azul de metileno (SAAM) por medio de la NMX-AA-039-SCFI-2001, todos analizados por espectrofotometría de UV-VIS.

En tubos múltiples se analizaron mediante el método de número más probable, los coliformes fecales (CF) y totales (CT), en tubos múltiples y utilizando para la prueba presuntiva un medio de cultivo de caldo de lactosado y una resiembra con medio de cultivo de verde brillante y EC-medio, según la NMX-AA-042-SCFI-2015 (DOF, 2016b).

2.2.3. Diagrama Hydra MEDUSA

Los diagramas de equilibrio químico son una herramienta en química que se utiliza para interpretar el comportamiento de las especies químicas en solución de acuerdo con los diversos parámetros medidos en un muestreo. El software tiene una base de datos con resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos y de laboratorio para alimentar el paquete computacional denominado “MEDUSA” (Make Equilibrium Diagrams Using Sophisticated Algorithms). El software proporciona una interfaz amigable que permite la entrada detallada de datos sobre los compuestos y condiciones experimentales con lo que permite generar varios tipos de diagramas a partir de las concentraciones de las distintas especies en mmol/L (Ibarra, 2025).

3. Resultados

Las tablas 3, 4, 5, 6, 7 y 8 muestran los parámetros analizados tanto en campo como en laboratorio para esta investigación, los cuales fueron contrastados con los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-127-SSA1-2021 (DOF, 2021).

Los valores de pH *in situ* oscilaron entre 6.2 a 6.5, indicando un carácter ligeramente ácido, mientras que la temperatura se mantuvo entre 16.8 y 18 °C. Por otra parte, el pH medido en el laboratorio presento valores entre 7.1 a 7.5. El incremento en los valores de pH obtenidos en laboratorio puede estar asociado con la temperatura del cuerpo de agua (Londoño y Gutiérrez, 2010). La conductividad eléctrica (*in situ*) presento valores de 233.3 a 568.5 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$, siendo la muestra ID2 (manantial Cabecera) con el valor más alto de conductividad y por lo tanto con más contenido de sales disueltas (Tabla 3).

Tabla 3. Parámetros transitorios.

Tipo de muestreo		<i>in situ</i>		Laboratorio	
ID	Manantial	pH	Temperatura (°C)	pH	Conductividad eléctrica $\mu\text{S}/\text{cm}^2$
1	Ojo de Agua	6.2	18	7.1	233.3
2	Cabecera	6.5	16.8	7.5	568.5
Límites permisibles NOM 127		6.5 - 8.5	-	6.5 - 8.5	-

Fuente: elaboración propia (trabajo de campo y resultados de laboratorio).

Los ST, SST y SDT en las muestras de manantial presentaron valores heterogéneos. En la muestra ID1 perteneciente al manantial ojo de agua, presentó un promedio de ST menor con un valor de 250 mg/L, mientras que la muestra ID2 presentó valores más altos de ST de 392 mg/L. Los SST en las dos muestras ID1 y ID2 registraron un valor de 1 mg/L en este parámetro, en cuanto SDT se observa que el manantial ID2 presentó valores más altos que ID1, con un índice de 391 mg/L y del manantial ID1 de 249 mg/L, lo que está directamente relacionado con una alta conductividad eléctrica de 568.5 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ (Tabla 4).

Tabla 4. Parámetros de la calidad del agua: ST, SST y SDT.

Tipo de muestreo		Laboratorio		
ID	Manantial	ST (mg/L)	SST (mg/L)	SDT (mg/L)
1	Ojo de agua	250	1	249
2	Cabecera	392	1	391
Límites permisibles NOM 127		-	-	1000

Fuente:elaboración propia (resultados de laboratorio).

En cuanto a la alcalinidad total (mg/L) los valores registrados para los manantiales van de 119.4 a 149.3 mg/L de CaCO_3 , la acidez en las muestras registró valores de manantial Ojo de agua con ID1 de 14.7 mg/L de CaCO_3 y para manantial cabecera ID2 de 16.6 mg/L de CaCO_3 . La dureza total en las muestras de agua con menor valor se registró la muestra ID1 con 87 mg/L de CaCO_3 y la muestra ID2 se registró con mayor dureza de 175 mg/L. Los cloruros presentaron valores que van de 14.3 a 35.3 mg/L, siendo la muestra ID2 la que registra una tendencia con el valor más altos en ciertos parámetros (Tabla 5). En cuanto a color las muestras no registraron ningún valor de color aparente (0 PtCo) (Chacón, 2017). Mientras que, la turbiedad presenta valores de 0.3 a 0.2 UNT respectivamente, siendo la muestra ID1 del manantial ojo de agua la que presentara el valor más alto. En relación con la DQO y DBO_5 , la presencia de DQO en las muestras analizadas fue nula, el valor de DBO_5 para los dos manantiales fue de 7.3 mg/L O_2 . Por lo tanto, el agua no presenta niveles altos de contaminación en este parámetro (Tabla 6).

Los compuestos nitrogenados (N-NO_3^- , N-NO_2^- y N-NH_3^-) en los tres parámetros no rebasan el límite permisible de la norma 127, sin embargo, en N-NH_3^- no se obtuvieron valores para los manantiales. Los sulfatos (SO_4^{2-}) oscilan en un rango de 7.3 a 24.4 mg/L SO_4^{2-} , siendo ID2 la muestra con más concentración; sin embargo, se encuentran las dos muestras muy por debajo del límite permisible que establece la norma mexicana de agua (Tabla 7).

Tabla 5. Parámetros de la calidad del agua: alcalinidad, acidez, dureza y cloruros.

Tipo de muestreo		Laboratorio			
ID	Manantial	Alcalinidad mg/L	Acidez mg/L	Dureza mg/L	Cloruros mg/L
1	Ojo de agua	119.4	14.7	87	14.3
2	Cabecera	149.3	16.6	175	35.3
Límites permisibles NOM 127		--	--	500	700

Fuente: elaboración propia (resultados de laboratorio).

Tabla 6. Parámetros de la calidad del agua: color, turbiedad, DQO y DBO₅.

Tipo de muestreo		Laboratorio			
ID	Manantial	Color PtCo	Turbiedad UNT	DQO mg O ₂	DBO ₅ mg O ₂
1	Ojo de agua	0	0.3	0	7.3
2	Cabecera	0	0.2	0	7.3
Límites permisibles NOM 127		15	4	-	-

Fuente: elaboración propia (resultados de laboratorio).

Tabla 7. Parámetros de la calidad del agua: sulfatos, derivados del nitrógeno, nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal.

Tipo de muestreo		Laboratorio			
ID	Manantial	SO_4^{2-} mg/L	N-NO_2^- mg/L	N-NH_3^- mg/L	N-NO_3^- mg/L
1	Ojo de agua	7.3	0.08	0	2.7
2	Cabecera	24.4	0.06	0	8.3
Límites permisibles NOM 127		400	0.9	0.5	11

Fuente: elaboración propia (resultados de laboratorio).

Los fosfatos más bajos fueron dados por la muestra ID1 con un valor de 2.1 mg/L, mientras que el valor más alto corresponde a la muestra ID2 con 8.1 mg/L PO_4^{3-} . En las dos muestras de SAAM, no rebasó el límite máximo permisible con valores de 0.01 y 0.2 mg/L, este parámetro está relacionado con la presencia de sustancias artificiales como el uso de detergentes. Finalmente, en cuanto a los coliformes totales tuvo un valor de 7 el manantial (ID1) ojo de agua, mientras que la muestra ID2 fue la muestra que presentó más contaminación en este parámetro con un valor de 240 NMP/100 mL, respecto a los coliformes fecales no hay presencia en ambas muestras de agua (Tabla 8).

Tabla 8. Parámetros de la calidad del agua: fosfatos, SAAM, coliformes totales y coliformes fecales.

Tipo de muestreo		Laboratorio			
ID	Manantial	PO_4 mg/L	SAAM mg/L	Coliformes totales NMP/100 MI	Coliformes fecales NMP/100mL
1	Ojo de agua	2.1	0.01	7	0
2	Cabecera	8.1	0.2	240	0
Límites permisibles NOM 127		-	-	0	0

Fuente: elaboración propia (resultados de laboratorio).

La figura 3 muestra el diagrama obtenido mediante el software HYDRA-MEDUSA en el cual se observan las especies predominantes en solución, para el caso de estos cuerpos de agua son los bicarbonatos que aumenten en relación con el pH.

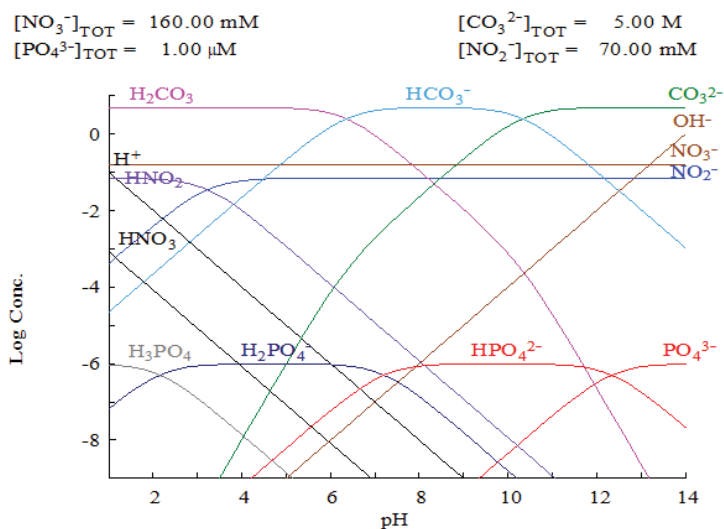


Figura 3. Diagrama de especies. Software HYDRA-MEDUSA.

Fuente: elaboración propia a partir del Software HYDRA-MEDUSA.

4. Discusión

En términos generales, los resultados analizados conforme a la NOM-127-SSA1-2021 se encuentran dentro de los límites máximos permisibles, con la excepción de los coliformes totales, cuya presencia no debería detectarse, indicando posibles riesgos microbiológicos.

La temperatura de las muestras varió entre 16 y 18.8 °C, un parámetro fundamental, ya que influye en la saturación del oxígeno disuelto, la actividad biológica y la concentración de bicarbonatos y carbonatos (Alvarez-Bastida, 2012). Temperaturas superiores a 15°C favorece el desarrollo de microorganismos, así como intensifica olores y sabores del agua (Rodier, 1998).

El pH mostró variación de aproximadamente un punto entre sitio y laboratorio. Esta alteración disminuye el oxígeno disuelto y aumenta los bicarbonatos, lo que resalta la importancia de medir el pH in situ (Custodio y Llamas, 1983).

La conductividad eléctrica más alta se registró en el manantial la cabecera ($568.5 \mu\text{S}/\text{cm}^2$), lo que reflejo un mayor grado de disociación de iones o mayor concentración de sales disueltas (Alvarez-Bastida, 2012). La acidez y alcalinidad observadas se deben principalmente a la disolución de CO_2 , carbonatos y bicarbonatos, predominando estos últimos, lo que concuerda con características típicas de aguas naturales (Torres, 2007). Los resultados indican que el agua del área de estudio va de ligeramente a moderadamente dura debido a la disolución de iones positivos (Fe^{3+} , K^{1+} , Ca^{2+} , Fe^{2+} y Al^{3+}) provenientes del subsuelo.

Entre los iones de atención destacan los nitratos, compuestos esenciales para la vida, sin embargo, en concentraciones elevadas generan efectos negativos en la salud humana. En los cuerpos de agua el contenido de estos suele no ser elevado salvo que exista contaminación por materia orgánica y/o fertilizantes, escorrentías, sistemas sépticos, aun cuando el límite permisible de la norma es $10\text{mg}/\text{L}$ se tienen evidencias que concentraciones arriba de $2.5\text{mg}/\text{L}$ causan enfermedades gastrointestinales, síndrome del bebé azul, así como cáncer en órganos genitales. Para el caso de estos cuerpos de agua las concentraciones de nitratos son considerables por lo que no debe utilizarse para uso y consumo humano, especialmente el manantial la cabecera el cuál presenta una concentración de $8.3\text{mg}/\text{L}$, aunque se encuentra por debajo de los límites máximos permitidos, considerada segura para el consumo humano esto puede representar una contaminación no reciente (Alvarez-Bastida, 2012).

En cuanto a la calidad microbiológica, la presencia de coliformes totales, así como el riesgo potencial que producen las bacterias como *Salmonella* y *Shigella*, refleja la vulnerabilidad de los manantiales no protegidos y la posibilidad de contaminación por materia fecal (Rodier, 1998). Esto resalta la necesidad de implementar medidas de protección y monitoreo continuo para garantizar el agua de consumo humano tanto en cantidad y calidad.

De acuerdo con Ibarra (2025), una forma de analizar la variación de la calidad fisicoquímica es mediante diagramas. El uso del programa HYDRA-MEDUSA permitió visualizar las especies iónicas predominantes en función del pH, mostrando que los bicarbonatos son las especies predominantes en los cuerpos de agua analizados. Cada curva del diagrama representa la concentración de una especie química, indicando cuál predomina a un pH específico, lo que coincide con los valores de pH, alcalinidad y acidez observados (Figura 3).

Finalmente, los resultados obtenidos permitieron caracterizar la calidad del agua de los manantiales estudiados, sin embargo, el número limitado de muestras restringe la representatividad a nivel regional. Asimismo, la ausencia de muestreos en distintas temporadas impidió evaluar posibles variaciones estacionales en los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, lo cual constituye una limitación del presente estudio y sugiere la necesidad de investigaciones futuras más amplias y sistemáticas.

5. Conclusiones

En relación con los manantiales analizados, el manantial de ojo de agua es el único que cumple con la mayoría de los parámetros de la NOM-127-SSA1-2021, por lo que su uso para consumo humano podría considerarse adecuado. Sin embargo, los coliformes totales excedieron los límites establecidos en ambas fuentes de abastecimiento.

El manantial ID2 presentó los valores más altos en comparación con el manantial ID1 en ciertos parámetros como: pH, conductividad eléctrica, ST, SST, SDT, alcalinidad total, compuestos nitrogenados, SAAM. Lo que sugiere que el agua del manantial ID2 presenta mayor concentración de sales posiblemente derivado de algún foco de contaminación cercano con el manantial.

El diagrama HYDRA-MEDUSA mostró que las especies predominantes en solución son los bicarbonatos, cuya concentración aumenta conforme se incrementa el pH. Este comportamiento coincide con los valores de pH asociados a la alcalinidad y acidez observados en los manantiales del estudio. El ácido carbónico se disocia principalmente a

bicarbonato y no a carbonato, lo que indica una adecuada capacidad amortiguadora que contribuye a mantener un pH estable.

La presente investigación proporciona información valiosa sobre la calidad del agua de manantial en el área de estudio, la cual podría servir de base para desarrollar estudios orientados en la preservación de la salud humana. Se recomienda implementar un programa anual de monitoreo de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos para evaluar cambios en la calidad del agua y tomar decisiones oportunas, así como establecer zonas de protección y priorización de manantiales siguiendo los métodos propuestos por López *et al.* (2021) y Colín *et al.* (2023). Estas acciones contribuirían a prevenir la contaminación, conservar el entorno natural y garantizar el suministro de agua de calidad para las comunidades. Adicionalmente, se sugiere la realización de talleres de capacitación dirigidos a la población local, con el fin de involucrarla en el monitoreo de los manantiales, y la instalación de cercas perimetrales alrededor de los mismos para protegerlos de posibles fuentes de contaminación directa.

6. Agradecimientos

Agradecemos a las autoridades locales del municipio de Almoloya de Juárez por facilitar el acceso a las fuentes de abastecimiento, así como al Laboratorio de Calidad del Agua del IITCA por su valiosa colaboración en el análisis de las muestras de agua de manantial. Finalmente, expresamos nuestro agradecimiento a los revisores y editores por sus valiosas observaciones y sugerencias, que permitieron fortalecer este artículo.

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

- Alvarez-Bastida, C. (2012). Variabilidad Temporal de la Calidad del Agua del Municipio de Villa de San Antonio la Isla. Tesis de Maestría. Maestría en Ciencias Ambientales. Facultad de Química. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Ather, D., Muhammad, S., y Ali, W. (2022). Fluoride and Nitrate Contaminations of Groundwater and Potential Health Risks Assessment in the Khyber District, North-Western Pakistan. *Int. J. Environ. Anal. Chem.* 1–16.
<https://doi.org/10.1080/03067319.2022.2098475>
- Bhat, S.U., Nisa, A.U., Sabha, I., y Mondal, N.C. (2022). Spring water quality assessment of Anantnag district of Kashmir Himalaya: towards understanding the looming threats to spring ecosystem services. *Appl Water Sci*, 12:180. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01691-7>
- Cantú, P. C. (2025). Agua para lograr el desarrollo sostenible. *Sustentabilidad Ecológica*, 28(130), pp. 66-72.
https://www.researchgate.net/publication/389515538_AGUA_PARA_LOGRAR_EL_DESARROLLO_SUSTENTABLE
- Chacón, M. Y. (2017). Análisis físico y químico de la calidad del agua. Ediciones USTA.
- CONAGUA. (2024). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Toluca (1501), Estado de México.
https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/edomex/DR_1501.pdf
- Colín, M. A., Esquivel, J.M., y Salcedo, E.R. (2025). Evaluación multicriterio: un método para proponer una red de monitoreo de calidad. Caso de estudio. En UAEMéx (ed.), *Ordenación territorial hacia la sostenibilidad* (pp. 45-60). UAEMéx.
<http://www.uaemex.mx>

- Colín, M. A., Esquivel, J. M., Salcedo, E. R., Álvarez, C., Padilla, J. G., Lopezaraiza, M. E., y Talavera, Ó. (2023). Human Health Risk and Quality Assessment of Spring Water Associated with Nitrates, Potentially Toxic Elements, and Fecal Coliforms: A Case from Southern Mexico. *Water*, 15(10), 1863. <https://doi.org/10.3390/w15101863>
- CONAGUA-SEMARNAT. (2024). Estadística del agua en México 2023. Edición, 2024. México. https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/Descargas/pdf/EAM2023_f.pdf
- Custodio, E. y Llamas, M. R. (1983). Hidrología Subterránea. Ed. Omega. 2ª Edición Tomo I y Tomo II, Barcelona.
- Davraz, A., y Batur, B. (2021). Hydrogeochemistry Characteristics of Groundwater and Health Risk Assessment in Yalvaç-Gelendost Basin (Turkey). *Applied Water Science*, 11, 67. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01401-9>
- DOF. (1993). Norma Oficial Mexicana NOM-014-SSA1-1993. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo. Diario Oficial de la Federación, México, D.F.
- DOF. (2016a). Norma Oficial Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015. Análisis de agua-medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba. Diario Oficial de la Federación, México, D.F.
- DOF. (2016b). Norma Oficial Mexicana NMX-AA-042-SCFI-2015. Análisis de agua-enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y escherichia coli-método del número más probable en tubos múltiples. Diario Oficial de la Federación, México, D.F.
- DOF. (2021). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021. Uso y consumo humano Límites permisibles de calidad del agua. Secretaría de Economía. Diario Oficial de la Federación, México, D.F.

- El Mountassir, O., Bahir, M., Ouazar, D., Chehbouni, A., y Carreira, P.M. (2022). Temporal and Spatial Assessment of Groundwater Contamination with Nitrate Using Nitrate Pollution Index (NPI), Groundwater Pollution Index (GPI), and GIS (Case Study: Essaouira Basin, Morocco). *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 29, 17132–17149. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16922-8>
- Esquivel, J. M. (2008). Evaluación del peligro de contaminación de las aguas subterráneas como herramienta para facilitar su uso sustentable: manantiales de Almoloya de Juárez, Estado de México. Tesis de Licenciatura. Licenciatura en Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México.
- Esquivel, J.M., Expósito, J.L., Esteller, M.V., Gómez, M.Á., Medina, C.M., y Fonseca, C.R. (2022). Prioritization of areas for groundwater monitoring using analytic hierarchy process method in Geographic Information Systems: a case of Mexico. *Int J Environ Sci Technol*, 20:5965–5982. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04383-6>
- Esquivel, J. M. (2015). Diseño óptimo de redes dinámicas de monitoreo de agua subterránea mediante el uso de SIG y escenarios hidrogeológicos. Tesis de Doctorado. Posgrado en Ciencias del Agua de la Universidad Autónoma del Estado de México.
- Gobierno de México (2025). Plan Nacional de Desarrollo 2025 - 2030, México, Gobierno Federal. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/981072/PND_2025-2030_v250226_14.pdf
- Ibarra, L.E. (2025). Uso del Software HYDRA-MEDUSA como herramienta para predecir y validar especies químicas: Síntesis y Caracterización de precipitados. Tesis de Licenciatura. Licenciatura en Ingeniería de Materiales. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería.
- IFOMEGEM. (1994). Carta Geológica del Estado de México *escala 1:250,000*. Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México.

- INEGI. (2024). Marco geoestadístico. En Shapefile capas vectoriales de entidades y del Estado de México. <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/#descargas>.
- Londoño, A., Giraldo, G. I., y Gutiérrez, A. A. (2010). Métodos analíticos para la evaluación de la calidad fisicoquímica del agua. Recuperado de: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/54604>.
- López, S., Expósito, J.L. y Esteller, M.V. (2016). Regionalización y clasificación de manantiales en el Estado de México. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, 10(1), 453-459. https://www.researchgate.net/publication/383265457_Regionalizacion_y_clasificacion_de_manantiales_en_el_Estado_de_Mexico
- López S., Expósito, J.L., Esteller, M.V., Gómez, M.A., Paredes, J., y Esquivel, J.M. (2021). Delineation of protection zones for springs in fractured volcanic media considering land use and climate change scenarios in central Mexico region. *Environ Earth Sci.* 80, 366. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09662-y>
- Moldovan, A., Hoaghia, M.A., Kovacs, E., Mirea, I. C., Kenesz, M., Arghir, R. A., Petculescu, A., Levei, E. A., y Moldovan, O. T. (2020). Quality and Health Risk Assessment Associated with Water Consumption—A Case Study on Karstic Springs. *Water*, 12(12), 3510. <https://doi.org/10.3390/w12123510>
- Núñez, J.M. (5 de abril de 2024). *Opinión: Los desafíos de México frente a la crisis por escasez de agua*. IBERO. <https://ibero.mx/prensa/opinion-los-desafios-de-mexico-frente-la-crisis-por-escasez-de-agua>.
- Prince F.J., y Espinoza B.M. (2021). Una Mirada a la calidad del agua. Secretaría de Medio Ambiente-IMTA. Sección Políticas Públicas de la Agenda Nacional. 03. México. <https://www.gob.mx/imta/es/articulos/una-mirada-a-la-calidad-del-agua?idiom=es>

- Rodier, J. (1998). *Análisis de aguas. Aguas naturales, aguas residuales, agua de mar*. 1ª Edición, Editorial Omega S.A. Barcelona.
- Roşca, O.M., Dippong, T., Mariana, M., Mihalia, C., Mihalescua, L., Hoaghiab, M.A., y Jelea M. (2020). Impact of anthropogenic activities on water quality parameters of glacial lakes from Rodnei mountains Romania. *Environmental Research*, 182:109136.
- Torres, M. (2007). *Evaluación de la Calidad del agua de la Cuenca Lerma-Chapala*. Trabajo de servicio social. Universidad Autónoma Metropolitana. México.
- United Nations-UN. (2018). *European global navigation satellite system and copernicus: supporting the sustainable development goals: building blocks towards the 2030 agenda*. United Nations Ofce, Vienna.
- Wissink, J. G., y Herlina, H. (2023). Surface-temperature-induced Marangoni effects on developing buoyancy-driven flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 962, A23. <https://doi.org/10.1017/jfm.2023.263>

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, crodriguezs@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 antroponaturales, 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).

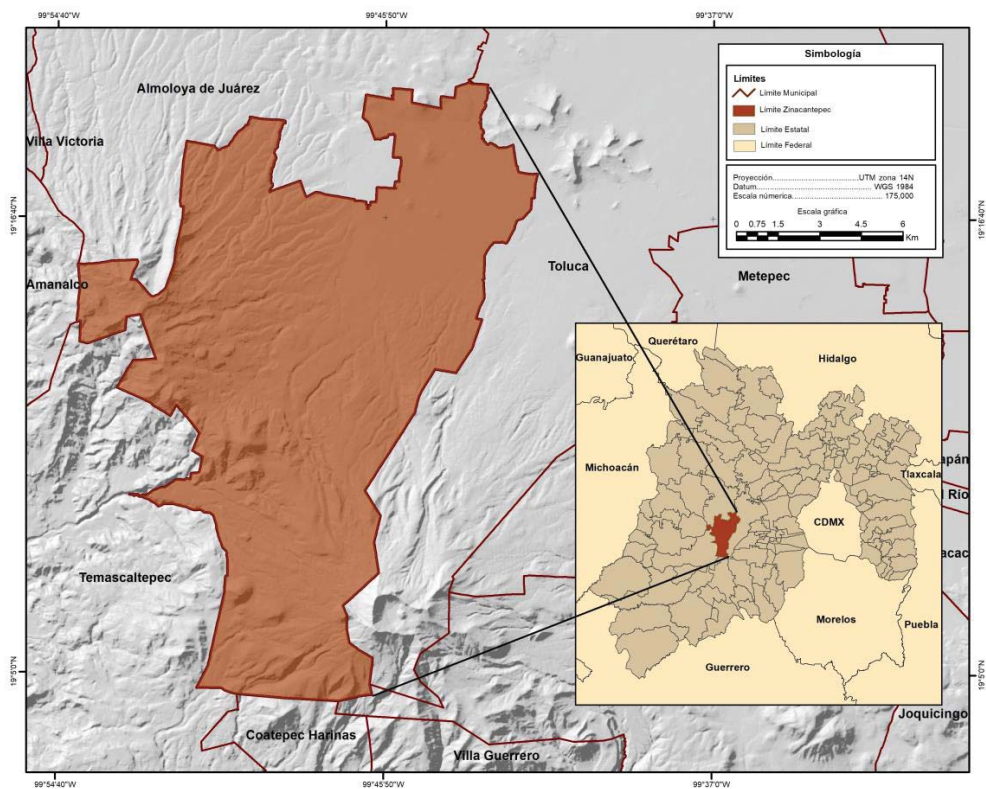


Figura 1. Mapa de localización geográfica de Zinacantepec.

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).

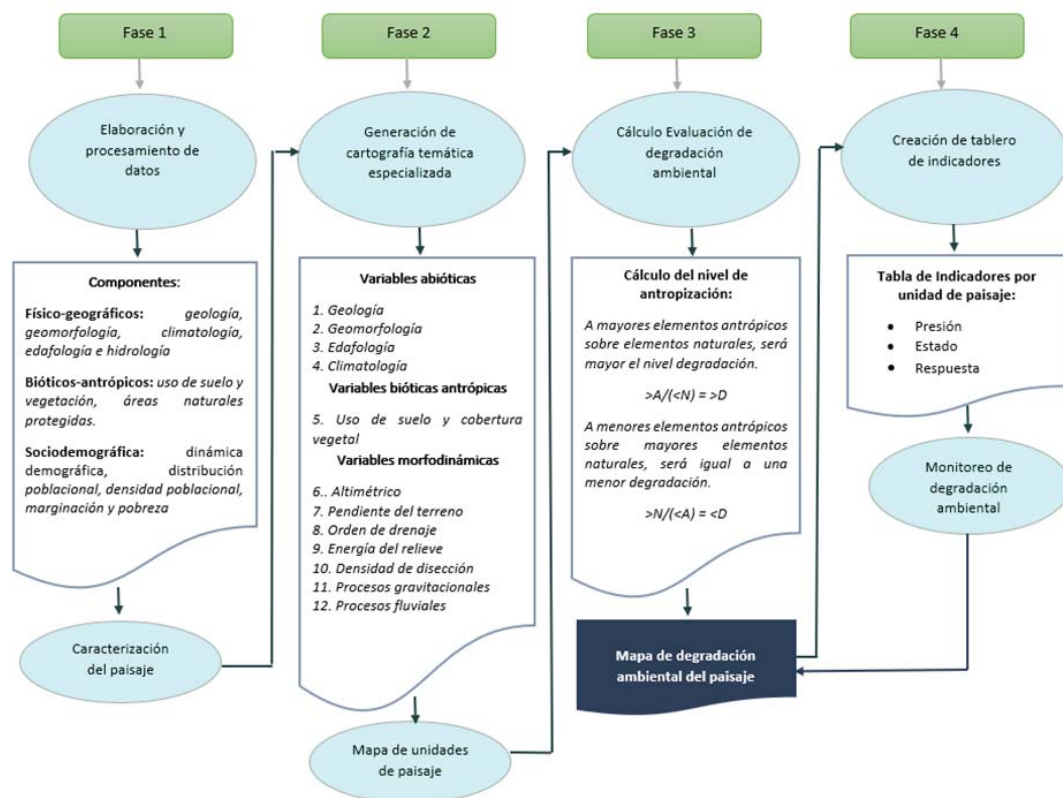


Figura 2. Esquema metodológico.

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 geoportal 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 de 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.

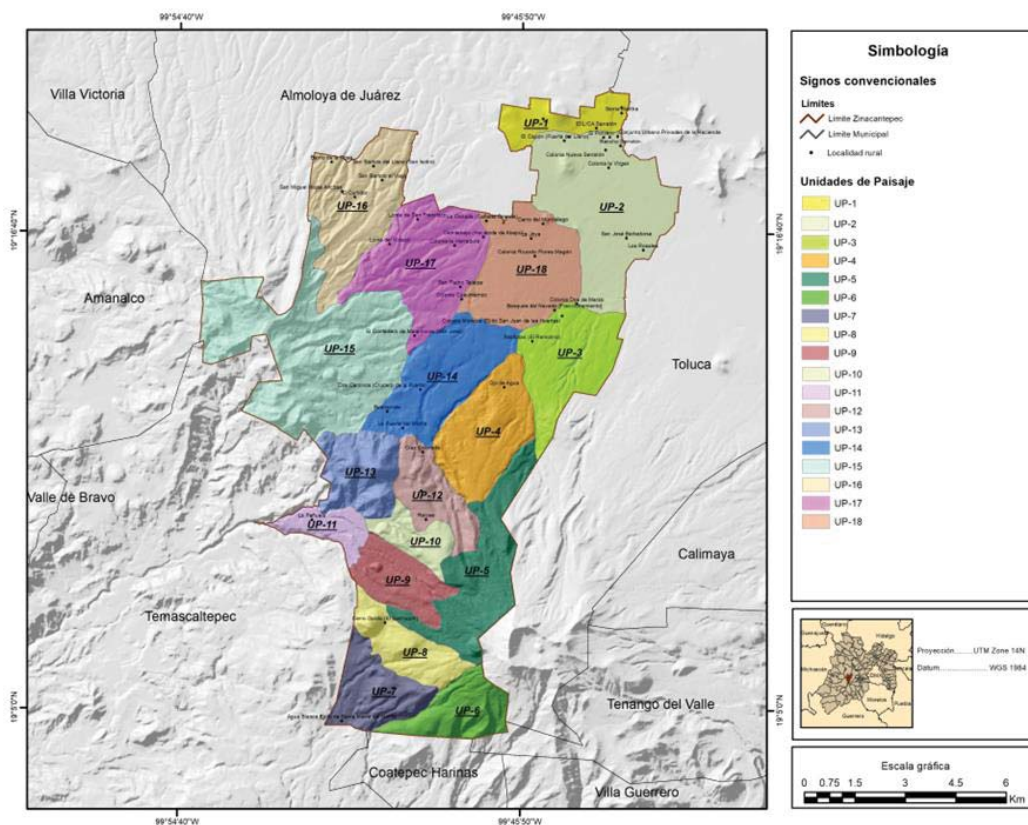


Figura 3. Mapa Unidades de Paisaje.

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).

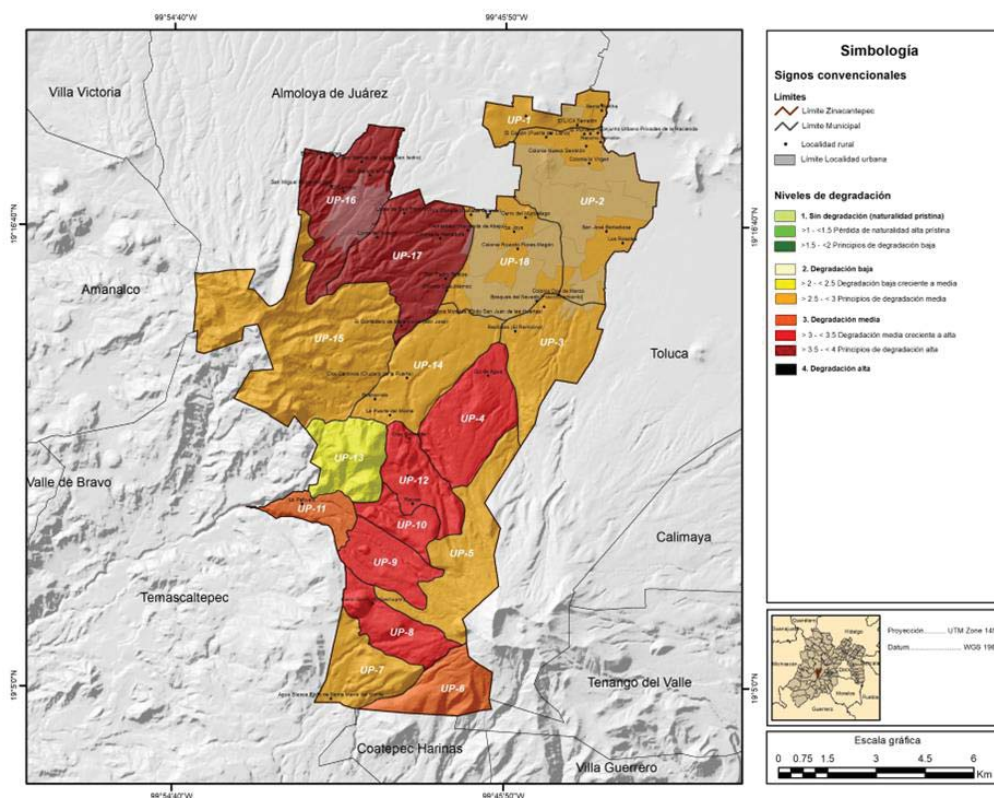


Figura 4. Evaluación de Degradación Ambiental.

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&themeId=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.

- Figuerroa 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).

Análisis espacial del agave, condiciones edáficas y desplazamiento de cultivos tradicionales en la Región Centro de Jalisco

Spatial Analysis of Agave, Edaphic Conditions, and Displacement of Traditional Crops in the Central Region of Jalisco

Guadalupe Quezada Chico^{1*}, Martín Vargas Inclán¹, Raúl Acevedo Rosas¹, Juan Manuel Cuevas Elicerio¹ y Ana Paola Izquierdo Saguilan¹

¹Departamento de Geografía y Ordenación Territorial de la Universidad de Guadalajara, Zapopan, Jalisco, México, C.P. 44100. guadalupe.quezada@academicos.udg.mx,
martin.vinclan@academicos.udg.mx, raul.acevedo@academicos.udg.mx,
juan.cuevas4616@alumnos.udg.mx, ana.izquierdo2135@alumnos.udg.mx,
<https://orcid.org/0009-0003-9259-4167>, <https://orcid.org/0000-0002-1183-2326>,
<https://orcid.org/0000-0002-6911-7915>, <https://orcid.org/0009-0006-5679-5692>,
<https://orcid.org/0009-0007-3106-193X>

*Autor(a) de Correspondencia

Recibido: 04/08/2025. Aceptado: 17/01/2026. Publicado: 05/02/2026.

Cómo citar este artículo: Quezada Chico, G., Vargas Inclán, M., Acevedo Rosas, R., Cuevas Elicerio, J. M. e Izquierdo Saguilan, A. P. (2026). Análisis espacial del agave, condiciones edáficas y desplazamiento de cultivos tradicionales en la Región Centro de Jalisco. *Geografía Aplicada*, 2(1), 174-199.

Resumen

El agave, con una afinidad xerófila, prospera en tierras poco productivas y delgadas, estos terrenos poco fértiles para cultivos básicos como maíz y frijol, son buenos para nopales y magueyes, el agricultor (ejidatario) los destinaba para no tener la tierra sin cultivo. Cuando el precio del agave subió significativamente de centavos a pesos, el agricultor que tenía agave, prosperó económicamente, ejemplo para otros, algunos con tierras empezaron a plantar agave por su cuenta o a hacer contrato con la empresa tequilera. A ello surgen preguntas como: ¿todos los suelos son aptos para la plantación de agave?, ¿qué pasó con los cultivos anteriormente sembrados? Por ello, se buscó en el trabajo Analizar la expansión del agave en relación con las condiciones edáficas y vegetación tradicional a fin de identificar las nuevas plantaciones en diferentes tipos de suelo y su vínculo con el desplazamiento de cultivos tradicionales y cambios en el uso del suelo. Lo anterior, mediante análisis espacial utilizando imágenes LandSat 8, Google Earth (2015-2023) y actualización de superficie con exploración de campo. Los resultados muestran que el agricultor tradicional, con la esperanza de tener buen patrimonio económico, se expandió en cualquier tipo de suelo, aun en aquellos fértiles en el sentido de nutrientes y sobre todo profundidad, como el Feozem y Regosol, en su mayor parte, hasta suelos contrarios con problemas de inundación como Vertisol y Solonchak; sembró hasta llegar a una sobreoferta de plantaciones. Lo que resultó fue que, a finales del año 2023, el precio cayera significativamente de 29.00 pesos hasta 7.00 pesos, pero quedaron las plantaciones en los tipos de suelos profundos, donde había cultivos básicos de maíz y frijol, como áreas de selva baja caducifolia y algunos bosques de encino y encino - pino. En conclusión, el panorama que se presenta es que, si el agave prospera en suelos no ideales dentro de su fenología, se ampliará sus parámetros agroclimáticos, pero, en otro sentido de desplazamiento, aumentarán las importaciones de grano y seguirá el desabasto de cultivos básicos.

Palabras clave: Agave, edafología, vegetación, cultivos básicos, precios.

Abstract

Agave, with a xerophytic affinity, thrives in unproductive and thin lands, these lands, which are not very fertile for basic crops such as corn and beans, are good for nopales and magueyes, the farmer (ejidatario) traditionally used them in order to avoid leaving the land uncultivated. When the price of agave rose significantly from cents to pesos, farmers who had agave plantations prospered economically, became an example for others; some landowners began to plant agave on their own or to make a contract with the tequila company. This situation raises questions such as: are all soils suitable for planting agave? what happened to the crops previously planted? Therefore, the work sought to analyze the expansion of agave in relation to soil conditions and traditional vegetation in order to identify new plantations in different soil types and their link with the displacement of traditional crops and changes in land use. The above was achieved through spatial analysis using LandSat 8 images, Google Earth (2015-2023) and surface updating with field exploration. The results show that the traditional farmer, hoping to have a good economic asset, expanded agave cultivation into all type of soils, even those fertile in terms of nutrients and especially depth, such as Phaeozems and Regosols, for the most part, to contrary soils with flooding problems such as Vertisols and Solonchaks; it sowed until reaching an oversupply of plantations. What resulted was that, at the end of 2023, the price fell significantly from 29.00 pesos to 7.00 pesos, but the plantations remained in the deep soil types, where there were basic crops of corn and beans, such as areas of tropical deciduous forest and some oak and oak-pine forests. In conclusion, the scenario suggests that if agave thrives in soils that are not ideal within its phenology, its agroclimatic parameters will expand; however, in another sense of displacement, grain imports will increase and the shortage of basic crops will persist.

Keywords: agave, edaphology, vegetation, staple crops, prices.

1. Introducción

De acuerdo a la Comisión Estatal del Agua del estado de Jalisco, la Región Centro, es una de las 12 regiones del estado de Jalisco, con una superficie de 5,505.35 km², lo que equivale aproximadamente al 6.87% de la superficie del estado. Comprende los municipios de Acatlán de Juárez, Cuquío, Guadalajara, Ixtlahuacán de los Membrillos, Ixtlahuacán del Río, Juanacatlán, El Salto, San Cristóbal de la Barranca, Tlajomulco de Zúñiga, Tlaquepaque, Tonalá, Villa Corona, Zapopan, Zapotlanejo (CEA Jalisco, 2025).

La expansión del agave (*Agave tequilana* F.A.C. Weber) parece ser común en el campo; sin embargo, en década de los años noventa, se tenían grandes extensiones de maíz y otros cultivos, hoy en día la percepción visual es el mosaico de agave y vegetación, o agave y maíz, inclusive en lugares relativamente inaccesibles, por ello surgen preguntas como, ¿cuáles son las causas de crecimiento de ese cultivo con plantaciones hacia todos los lugares?, otras son, ¿todos los suelos son aptos para la plantación de agave?, ¿qué pasó con los cultivos anteriormente sembrados?, ¿el agave los desplazó? En consecuencia, surge la hipótesis, el agave tendrá desventaja y no prosperará positivamente en suelos ideales para el agave, como son, suelos permeables, pendientes moderadas, generalmente de textura, francos arenosos y francos arcillosos, gravosos, moderadamente delgados, etc., en relación al establecimiento en superficie en otros ambientes edáficos fértiles y profundos, que tendrá como resultado el desabasto de alimentos básicos. Éstos ambientes más productivos y más profundos son del orden de Luvisol, Regosol, Cambisol y hasta Vertisol, en pendientes topográficas planas y otras moderadamente onduladas, contrario a los suelos que tradicionalmente utiliza el agave como son los de tipo Litosol, Luvisol, Feozem, etc., sobre escarpes pronunciados y estribaciones al Río Santiago, un tanto pedregoso, entre otros, pero con el dominio de pendientes con escarpes pronunciados. Tena et al. (2023) mencionan que el paisaje y condiciones del *Agave tequilana* se desarrolla mejor en áreas escarpadas del Río Santiago, concordante con este escrito, en lo referente al área de Amatitán y Tequila como municipios tradicionales de producción de tequila. También en el sentido de expandirse a tierras más planas y dominar diferentes paisajes. En 2006 la UNESCO reconoce al paisaje agavero y a las

antiguas instalaciones industriales de tequila como patrimonio cultural de la humanidad en la categoría de Paisaje Cultural (UNESCO, 2006, en Tena et al., 2023); sin embargo, no solo es relieve plano, sino diferentes tipos de suelos lo que puede ocasionar merma en la producción de agave y, sobre todo, desplazamiento de cultivos básicos.

De acuerdo a información recabada en trabajo de campo (comunicación personal, 30 agosto 2023), la expansión del agave es mediante dos formas básicas de plantación: la primera, es la contratación de una tequilera o industria del tequila, donde el agricultor solicita la contratación; al ser candidato, es visitado por los representantes de la empresa para hacer estudios diversos del medio físico como tipo de suelo, relieve, entre otros, con el fin de evitar problemas posteriores como encharcamientos y pérdida de plantas por pudrición de tallo o enfermedades de virus; de esta manera la tequilera asegura su rendimiento. La segunda forma de plantación es mediante iniciativa del agricultor o campesino, que por su cuenta compra plántula o hijuelo de agave y con sus recursos lo planta bajo su criterio agrícola; sin embargo, en estos casos y de acuerdo a revisión de campo, se vieron parcelas erosionadas, anegadas, con abundante maleza y en ocasiones con suelos que tienen problemas de drenaje como son de textura arcillosa de tipo Vertisol. Al respecto Herrera, et al., (2018) mencionan que, en estudio de campo con 50 productores del municipio de Tequila, Jalisco, que de las tres formas de contratación del agave de tequila son el arrendamiento (contratación con empresa), la aparcería (parcela de agricultor) y la mediería (a medias entre productores o productor y empresas agrícolas) en la primera, los arrendadores realizan las labores, ésta, predomina, mientras las dos últimas el agricultor “mete mano” a sus tierra y cultivos.

La expansión del agave se debe a dos causas: la denominación de origen y el precio que adquiere el agave, el cual ha tenido altas y bajas. La Denominación de Origen (DO) es una legitimación a través de un orden jurídico, da la certificación formal al ser publicada por la Secretaría de Economía por medio del IMPI (El Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial) en el Diario Oficial de la Federación (DOF, 1993). En este caso, el Estado mexicano ha otorgado la DO a cuatro

bebidas espirituosas elaboradas con distintas variedades de agave: el tequila, el mezcal, la bacanora y el sotol (Rodríguez, 2007)

Con respecto al precio en los años ´80, éste se encontraba en alrededor de \$1.00 peso. En ese tiempo la calidad de los terrenos estaba bien distinguida o separada, las tierras productivas con buena a moderada calidad de suelo eran sembradas con cultivos básicos, y las de menor calidad (tierras delgadas y pedregosas) generalmente con cultivo de agave, éste, en su mayor parte, estaba prácticamente sembrado en laderas de cerros y tierras que tradicionalmente se sembraba agave tequilero, como son, parcelas en Tequila y Amatitán, entre otros; sin embargo, entre 1999-2004 se repuntó la curva a un pico máximo de \$ 11.00 pesos lo que redituó ganancias significativas a los propietarios que tenían sembrado agave en producción; a consecuencia, las parcelas ampliaron la superficie de siembra, inclusive a suelos de buena calidad; pero, posteriormente bajó el precio y la frontera del agave disminuyó (Contreras, 2016).

El Servicio de Información Agroalimenticia y Pesquera (SIAP, 2022) de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) para el año productivo 2021, menciona que el rendimiento de agave fue de 78.15 toneladas por hectárea, con un precio medio rural de \$17,563.79 por tonelada, lo que significa un precio unitario de \$17.5 pesos que se traduce en un buen precio para la cosecha de este cultivo. Datos de campo (comunicación personal, 2023), revelan que a finales de 2023 el precio estaba elevado a razón de \$29.00 y \$30.00 pesos en campo, y para enero de 2024, se desplomó hasta \$7.00 pesos en el mismo sitio. El Consejo de Desarrollo Agropecuario y Agroindustrial de Jalisco (2023) menciona, que el precio del agave continúa en caída libre, afirmando que: “La abundancia de materia prima ha llevado a una disminución alarmante en el precio del agave, alcanzando los 5 pesos por kilo. La expansión de las plantaciones ha superado la demanda real, generando una situación que podría desencadenar una crisis a largo plazo”

La expansión del agave obedece a varios factores como son los requerimientos agroecológicos, que son considerados en la DO; sin embargo, el precio es el detonador, así como ejemplo, en el municipio de Purísima del Rincón, en Guanajuato, un productor menciona que hay varias marcas como Don Julio, José Cuervo, entre otros, donde el precio de esas marcas ronda entre \$17.00 y

\$34.00 pesos el kilogramo, su precio es de acuerdo a la denominación de origen y curiosamente su cercanía a Jalisco, o sea la proximidad (Romero Martínez, 2021).

En el sentido edafológico se ha extendido en diferentes terrenos, profundos, delgados, negros, rojos, etc., con ello, hay el riesgo de no ser sitios o suelos idóneos, en ese crecimiento, se observa que los estudios de suelo y agave son pobres en la actualidad por parte del agricultor (comunicación personal, 2023); así, el agave puede desarrollarse en suelos pobres en cuanto a requerimientos nutricionales. Menciona Fregoso, et al. (2023) que en el área de Tonaya y Tuxcacuesco el agave se ha encontrado en suelos que se caracterizan por ser bajos a pobres en cuanto a nutrientes con valores de pH de 7.7, materia orgánica de 2.19% con deficiencia de nitrógeno, fósforo y potasio, por ello se consideran que los rendimientos del cultivo no son idóneos, aun cuando su naturaleza permite buen desarrollo en condiciones pobres, extremos en acidez y pocos nutrientes, así lo dice Cen-Cen, (Gómez y Martínez, 2015, en Fregoso et al., 2023). Las especies de agave presentan adaptaciones fisiológicas a distintas condiciones edáficas, de suelos ácidos rocosos volcánicos a piedras calizas de origen marino, baja disponibilidad de nutrientes como en altos contenidos de minerales, como en condiciones de baja o alta salinidad. El objetivo alcanzado de este trabajo fue, conocer la expansión actual del agave en relación de las condiciones edáficas y vegetación tradicionalmente establecida a nuevos ambientes de suelos más profundos, productivos y su avance a áreas agrícolas y vegetación. Con el fin de conocer nuevas circunstancias qué serán un referente a nuevos umbrales de los requerimientos edafoclimáticos, así como cultivos desplazados, si la planta prospera en condiciones diferentes a las ideales de su proceso fenológico.

2. Metodología

El proceso se generó en las siguientes etapas:

2.1. De gabinete: se realizó la preparación de materiales, que incluye la revisión bibliográfica acerca del agave y aspectos edáficos, climáticos, entre otros aspectos del medio físico. Se efectuó una búsqueda de material cartográfico en formato digital e imágenes para trabajar mapas previos

a la etapa de campo, el periodo del análisis cartográfico digital fue 2015 a 2023, se buscó aproximadamente 10 años de comportamiento, 2015 baja la densidad de superficie sembrada, a finales empieza a aumentar precio; también se determinó, por la calidad de imágenes; 2023 por tener una caída brusca en el precio de alrededor de 29.00 a 5.00 pesos, la actualización espacial fue mediante la revisión de nuevas plantaciones en campo. Los materiales cartográficos, fueron obtenidos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), y del Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco (IIEG). El material digital se trató con Quantum GIS (QGIS) que es de código abierto en formato libre.

2.2. Análisis de datos de imágenes y materiales cartográficos: el primero, mediante técnicas de fotoidentificación y fotointerpretación para establecer las áreas de cambio, ubicando puntos para revisión en campo, la primera en agaves de altura mayor a un metro, mientras que para las plantas pequeñas se buscaron patrones como alineación simétrica y comparándolos con patrones de otros cultivos como maíz, esta actividad, fue en imágenes de satélite libres de Landsat 8 del año 2015 y año 2023 escena 29046 (LANDSAT_SCENE_ID = "LC80290462015055LGN01" SPACECRAFT_ID = "LANDSAT_8" y LANDSAT_SCENE_ID = "LC80290462023205LGN00" SPACECRAFT_ID = "LANDSAT_8", respectivamente), resolución de 30 metros y 15 metros en tratamiento con bandas 432, principalmente, además, con apoyo de Google Earth (Google, s.f. [Vista de Región Centro del estado de Jalisco]).

El segundo análisis fue analógico, aunque anticuado fue efectivo para escalas grandes, mediante cartografía de Uso de suelo y Vegetación escala 1:250000 y la carta edafológica escala 1: 50000, que significa buena escala para obtener precisión en el análisis. El criterio fue utilizar la carta de Uso del suelo y vegetación de INEGI serie VII del año 2017, donde se revisaron las áreas de agricultura de temporal en su duración de cultivos, anual, semipermanente y permanente, (TA, TAS, TP), agricultura de riego en su duración anual, semipermanente y permanente (RA, RAS, RP); así como, las áreas de vegetación circundando estas unidades productivas, como criterios para la revisión en campo.

El tercer análisis de datos fue la revisión en Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), una revisión de superficies sembradas, cosechadas y costo rural por municipio y por distrito agrícola de agave, así como de maíz, para ver el grado de desplazamiento del cultivo básico anual, lo que arrojó datos para realizar una revisión temporal que culmina en datos estadísticos simples.

2.3. Trabajo de campo: se realizó en los años 2023 y 2024 con base en análisis y datos recabados en la etapa de gabinete. Se preparó el material de campo como es: el itinerario de lugares, los sitios marcados en carta topográfica y la planeación de rutas, específicamente, los mapas de carreteras y puntos previamente seleccionados de acuerdo a criterios discutidos, siguiendo los puntos seleccionados; sin embargo, en el recorrido se puso atención a las áreas de plantaciones recientes que no se detectaron en las imágenes y que no se señalaron en la carta de uso de suelo y vegetación; de manera similar, se buscaron plantaciones en áreas con deficiencia de drenaje y suelos con problemas de sales o sodio para agricultura.

Se procedió a revisar el tamaño del agave de los sitios planeados como aquellos recientemente encontrados, se puso atención y georreferenció los lugares con agave, instalados con plántula o hijuelos de 15 a 25 centímetros y que no fueron perceptibles en imágenes y ni algunas ortofotos, por fecha de imagen y reflectancia del suelo. En la mayor parte de los puntos se tomó una muestra de suelo para una inspección física y comprobación de la asociación edafológica del mapa de suelos de INEGI; cuando no se pudo acceder a algunas parcelas, sólo se tomaron notas a distancia y fotos, sin muestra de suelo. Las principales características físicas fueron textura, color, pedregosidad superficial, reacción al ácido clorhídrico, agua oxigenada, estructura del suelo, entre otras, Se debe aclarar que no fue posible hacer determinaciones de laboratorio de las muestras de suelo. De igual manera se registraron las parcelas de agave en lugares inaccesibles pero presentes para relacionarlos a nivel digital.

Se omitieron lugares con plantaciones de agaves ya conocidos y reportados en estudios relacionados, (por ejemplo, Tena, et.al., 2023) como fueron las parcelas del municipio de Tequila y Amatitlán en los márgenes del Río Santiago. Se centró en la expansión hacia municipios con un

perfil diferente al tequilero, ya que uno de los objetivos del estudio es el análisis espacial del agave y características edáficas; es decir, el crecimiento en la siembra a nuevos terrenos, como fueron los municipios del estado de Jalisco denominados con perfil maicero y frijolero, con criterios de agricultura de temporal, especialmente la agricultura de riego.

2.4. Reinterpretación: Una vez obtenidos los datos en campo se procedió a georreferenciar los puntos obtenidos en campo en la cartografía básica temática. Con cartografía temática en edafología de escala 1:50,000 y verificada en campo de la versión original de INEGI y revisado y digitalizado por IIGE (2024); además, de la serie VII de INEGI de uso del suelo y vegetación (2017). Se llevaron a cabo los análisis cartográficos y la correlación de las características físicas y aquellas inferidas mediante el uso de reactivos, como ácido clorhídrico y fenolftaleína, en las muestras de suelo, comparándolas con las reportadas en la cartografía de suelos.

3. Resultados y Discusión

La Región Centro del estado de Jalisco tiene características peculiares, por un lado concentra la Zona Metropolitana de Guadalajara y con ello la mayor población estatal, sin embargo lo relevante de la actividad económica relacionada con este trabajo, es la caracterización de ser un granero para el estado y en gran parte para el país, en lo relativo a cultivos básicos de maíz y frijol destacan como ejemplo Zapopan, Tlajomulco, Cuquío, etc. En cuanto a clima, roca y suelo, son ideales para producir gran cantidad de cultivos, en pendientes planas y moderadamente onduladas, pero además en escarpe pronunciado como Río Santiago, ideal para la plantación de Agave para el tequila.

El instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco (IIEG, 2022), señala en cuanto a la geografía y medio ambiente, que el Área Metropolitana de Guadalajara es un nodo para el desarrollo regional, la Región, presenta altitudes de 740 a 2,958 metros sobre nivel del mar (msnm), clima en su mayor parte de templado subhúmedo, temperatura media anual de 20.3 °C con precipitación media anual de 952 milímetros (mm), geología en mayor parte de basalto y toba, suelos predominantemente de Feozem, Regosol y Luvisol, relieve generalmente plano con

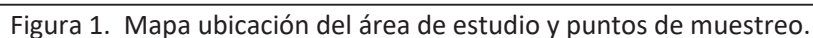
pendientes menores a 5%. Con respecto a la agricultura, predomina el maíz de grano en un 55. 64%, le sigue agave con 23. 67% y restan el maíz forrajero, tomate verde, nopalitos, Chía, frijol y otros con un 20.69% de la región (IIEG, 2022).

3.1. Análisis cartográfico

El trabajo arrojó un mayor muestreo en Villa Corona con un 42%, Acatlán de Juárez, 20%, en Cuquío 5% y Arenal 5%, y el resto de municipios con menos del 5%. De 30 puntos planteados en campo, se colectaron 10 nuevos, con un total de 40 puntos registrados.

En el mapa de la Región Centro (Figura 1), se observa el muestreo de parcelas de agave, donde la distribución de los puntos fue con base en una revisión aérea por medio de imagen LandSat y de Google Earth (como se explicó en la metodología y verificación en campo), se puso especial atención a aquellos municipios que por definición sería contradicción los establecimientos de agave, como lo son zonas de graneros y zonas cañeras, en particular áreas de agricultura de riego y con suelos que suelen encharcarse como los de tipo Vertisol, destacando el municipio de Villa Corona. Así también, se revisaron zonas típicas de agave como son las inmediaciones al Río Santiago en Amatitán y El Arenal, Jalisco, que han sido productoras de agave por más de un siglo.

Con respecto al uso del suelo y vegetación y la relación con los puntos de muestreo, en el mapa de la figura 2, se utilizó la información de INEGI de Uso del suelo y Vegetación serie VII (2017) como la última versión en esta temática. Se realizó una caracterización de agricultura y vegetación para simplificar el análisis, se sobrepusieron los puntos de muestreo y se destacó que la mayor parte del avance de parcelas de agave es sobre agricultura de temporal anual con cultivos de maíz y sorgo, algunos puntos de agave sobre área de riego anual y semipermanente, así como en vegetación de selva baja caducifolia como algunos bosques de encino y encino–pino. Se muestra la tendencia primero sobre la agricultura de temporal de los nuevos puntos explorados como los existentes en municipios que no tenían cambio en crecimiento de agave.



Se encontró que no hay completa sustitución de las áreas agrícolas, se establecen mosaicos en parcelas con el maíz, sorgo y frijol. Igual surge en la agricultura de riego, son parcelas que no tiene agua, pero están en esa zona. En la vegetación, en esas áreas se abrieron nuevas parcelas de agave, pero generalmente es en zonas con vegetación secundaria y áreas que se utilizaban para pastoreo de ganado bovino, principalmente.

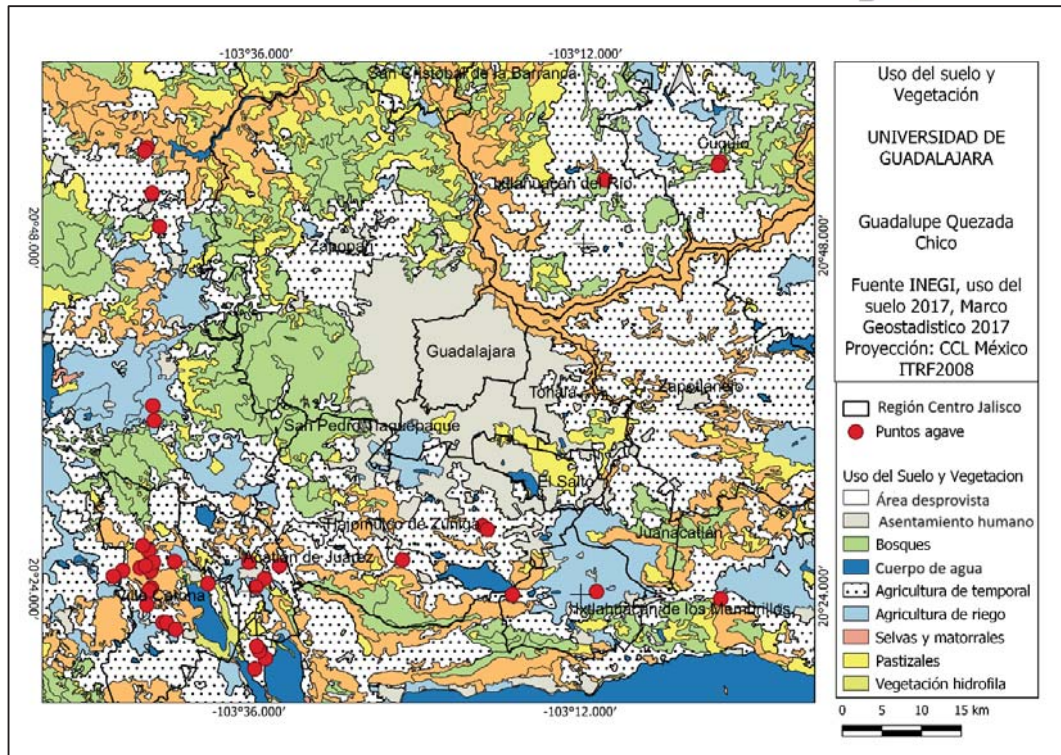


Figura 2. Mapa de Uso del suelo y Vegetación y puntos de muestreo.

Fuente: elaboración, propia obtenido de Mapa de Uso del Suelo y Vegetación serie VII de INEGI, edición 2017.

En el mapa edafológico de la figura 3, se nota gráficamente el avance de parcelas de agave que se encuentran sobre suelos de tipo Feozem, seguido de Regosol y Vertisol y poco en los de tipo Litosol. El primero con dominancia de horizonte A mayor a 18 cm, de textura franca, con consistencia friable, de moderada a alta porosidad entre otras cualidades favorables, que descansa sobre horizonte C de textura franco arenosa, y algunas en material de origen o parental, pero generalmente de profundidad moderada menor a los 50 cm. El Regosol conformado en mayor parte por suelo joven, pero profundo, son suelos donde domina, generalmente, material sedimentario con arenas y gravas. El Vertisol es un suelo donde domina la arcilla muy plástica en todo el perfil, pero además se caracteriza por presentar dilatación y contracción (época húmeda y seca). El Litosol que es un suelo menor a 15 cm, y descansa sobre roca.

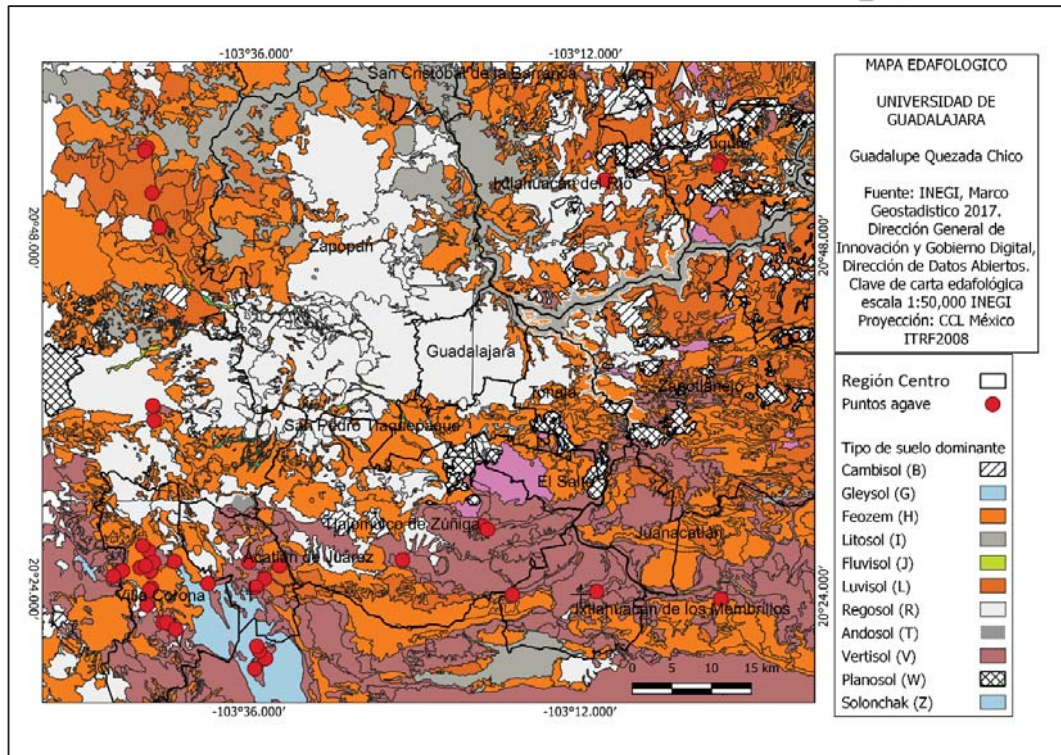


Figura 3. Mapa de suelos y puntos de muestreo.

Fuente: elaboración propia con datos digitales de INEGI en Conjunto de datos vectoriales edafológicos, 1: 50,000. Jalisco. Instituto de Información Estadística y Geográfica del Estado de Jalisco (2015), consultado en el año 2024.

3.2. Análisis de Campo

Se corroboró que la mayor parte de la expansión de agave fue sobre agricultura de temporal (58 %) del resto de uso de suelo y vegetación, aunque cabe mencionar, que en el mapa al contrastar los puntos de verificación, causaba incógnita que se visualizaba agave en la zona de riego en lo que respecta al municipio de Villa Corona y parte de Acatlán de Juárez por ser zonas de cultivos anuales y semipermanentes como maíz, sorgo, frijol, alfalfa y de caña de azúcar; sin embargo, entre esas parcelas se encontró agave (10 %) de acuerdo a la cartografía y trabajo de campo (Tabla 1).

El resultado en cartografía versus trabajo de campo, fue el crecimiento de agave sobre la agricultura de temporal que en su mayor parte sembraban maíz y sorgo. Además, se encontraron parcelas y corroboró de acuerdo a la etapa preliminar, encontrar agave sobre áreas de vegetación, algunas con vegetación secundaria como selva baja caducifolia, así como en áreas de bosques de encino y de pino-encino pero con menor porcentaje.

Tabla 1. Puntos de agave sobre Uso del suelo y vegetación.

Uso del Suelo serie VII	Puntos con agave %
Agricultura de Temporal anual (TA)	58
Agricultura de Temporal permanente (TP)	10
Agricultura de humedad anual (HA)	3
Agricultura de Riego anual (RA)	10
Agricultura de Riego semipermanente (RS)	13
Selva baja caducifolia con vegetación secundaria arbustiva (VSa/SBC)	3
Bosque encino con vegetación secundaria arbustiva (VSa/BQ)	3
Bosque pino-encino con vegetación secundaria arbórea (VSA/BPQ)	3

Fuente: elaboración propia a partir de Puntos de campo de agave versus carta de uso de suelo y vegetación serie VII de INEGI (2017).

Igual de importante, aunque fuera de la Región Centro, fue revisar puntos de agave del municipio de Amatitán y Tequila, que tradicionalmente tienen este cultivo. Así, se observó en la Fotografía de la figura 4, como buen referente, el dominante paisaje agavero, la agricultura de temporal permanente de agave sobre áreas de selva baja caducifolia. Nótese el relieve abrupto, que es poco productivo por pendiente para cultivos básicos como maíz y frijol; sin embargo, acertado para el agave por requerir poco suelo y poca humedad para su desarrollo.



Figura 4. Típico lugar de agave sobre selva baja caducifolia en barranca de Amatitán, Jalisco.

Foto: Quezada Chico (2023).

En lo que respecta al suelo, en el análisis cartográfico y de campo. De acuerdo a la tabla 2 de análisis edafológico versus trabajo de campo, en la Región, se observa que los suelos que prevalecen con agave son tipo Feozem de textura media y textura franca, caracterizados por tener horizonte A con alta porosidad, en campo con observaron con grava y esqueleto de piedras en su matriz, pero sigue dominando el horizonte con una consistencia friable, prácticamente suelos de poca profundidad y donde han prosperado con buen desarrollo de este cultivo, además, se encontraron suelos de tipo Luvisol de igual textura, aunque con más contenido de arcilla, son relativamente profundos y permiten buena permeabilidad y no encharcamientos, ideal de acuerdo a las características edafoclimáticas, tipificados por suelos sueltos o livianos, con contenido de óxidos (Tena, et.al., 2023). Lo inusual es encontrar agave en suelos que tienen problemas de drenaje como los de tipo Vertisol y los que presentan sales solubles en alguna época del año como son los Solonchak, estos últimos cercanos a la laguna salina de Zacoalco de Torres, San Marcos y Sayula.

Se comprobó que los suelos delgados, generalmente se encuentran sobre fases físicas de suelo líticas, dúricas inclusive gravosas, de acuerdo a la tabla 3 de fases del suelo, éstas características

físicas son limitantes para desarrollo de raíces como para hacer labores agrícolas con implementos, principalmente maquinaria; éstas se encuentran sobre suelos de tipo Litosol y Feozem , mientras que en los suelos más profundos como Regosol, Luvisol y Vertisol, están ausentes esas limitantes, no presentan problemas para la agricultura para la mayoría de cultivos como los granos básicos entre ellos, el maíz.

Tabla 2. Puntos de agave sobre Tipo y subtipo de suelo.

Tipo de suelo FAO 70	Puntos con agave %
Feozem (Hh/2). Textura media	18
Feozem (Hh/2) Textura media	5
Luvisol (Lc/2) Textura media	5
Luvisol (Lc/3) Textura fina	5
Regosol (Re/1) Textura Gruesa	8
Regosol (Re/2) Textura media	10
Vertisol (Vp/3) Textura fina	45
Solonchak (Zg/2) Textura media	3
Luvisol (Lv/3) Textura fina	3

Fuente: elaboración propia con base a carta de edafológica digital escala 1:50 000 del INEGI, sin fecha, y observación de campo.

Tabla 3. Puntos de agave sobre fase suelo.

Fase del suelo FAO 70	Puntos de agave %
Duricia Prof.	2.5
Ligeramente salino	2.5
Lítica	20
Lítica profunda	17.5
Pedregosa	15
Sin Fase	42.5

Fuente: elaboración propia a con base a Puntos de campo de agave y carta de edafológica digital escala 1:50 000 del INEGI, sin fecha.

Durante el trabajo de campo fue importante verificar áreas que se marcaban con agricultura de temporal, pero sobre suelos arcillosos de tipo Vertisol pélico, para ello se corroboró que la naturaleza del agave no permite anegación y que esas parcelas continúan con cultivo de maíz que

resiste más encharcamiento que una planta xerófila (Figura 5). Similar fue la verificación sobre suelos profundos de tipo Regosol en área de agricultura de riego semipermanente con caña de azúcar (Figura 6) en la zona cañera de Tala, Jalisco. Se comprobó que las plantaciones de agave en estas zonas son sobre lugares elevados y pequeñas elevaciones de otro tipo de suelo más arenoso.



Figura 5. Foto de Vertisol en Rodeo, Ixtlahuacán de los Membrillos, agricultura de temporal anual con maíz.

Foto: Quezada Chico (2023).



Figura 6. Agricultura de riego semipermanente con caña de azúcar, en Tala, Jalisco.

Foto: Quezada Chico (2023).

Parte de la verificación de campo fue confirmar el supuesto que la expansión del agave se presenta en suelos más productivos que los tradicionalmente usados para el agave, son los referentes a Luvisol, con pendientes suaves, que han albergado cultivos tradicionales de maíz como se muestra en la figura 7 en la zona de El Arenal, municipio que es agavero, pero que combina su actividad con cultivos básicos en un mosaico alternado, dejando al agave a pendientes y suelos más delgados.



Figura 7. Agave sobre Luvisol. Foto Arenal, Jalisco.

Foto: Quezada Chico (2023).

En un análisis de espacios con cultivo tradicional de agave se confirmó el tipo de suelo delgado de tipo Litosol y en algunos casos de tipo Feozem, suelos delgados menores de 15 cm y de 20 cm respectivamente que se mantienen estables por abundante pedregosidad, que en ocasiones se asocian a cultivos en agricultura de temporal permanente con especies de ciruela (*Spondias* sp.), estas huertas son redes que con raíces mantienen estable y resistente al suelo contra la erosión hídrica de grado alto, estos árboles, también son propias de la barranca del Río Santiago en los municipios de Tequila y Amatitán, Jalisco (Figura 8).



Figura 8. Ciruelo asociado con agave en barranca de Amatitán, Jalisco.

Foto: Quezada Chico (2023).

3.3. Análisis de información tabular

En cuanto al crecimiento del agave en un corte temporal del 2015 y 2022 se nota el crecimiento de las parcelas de agave en confrontación con maíz de grano, para la Región Centro del estado de Jalisco. En un análisis por distrito agrícola en el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). En la tabla 4, de 2015, es notorio que las parcelas de superficie sembrada de agave están muy por debajo de las parcelas de maíz, ejemplo, Cuquío presento 590 ha de agave y 9 450 ha de maíz, aun cuando el precio de del grano estaba por mitad del kilogramo de agave, de \$3.29 y \$6.32 pesos, respectivamente.

Tabla 4. Análisis por distrito agrícola 2015. Agave vs maíz en el Distrito de Zapopan.

Municipio	Cultivo	Sembrada ha	Cosechada ha	Rendimiento Ton/ha	Precio Tonelada	Precio Pesos / kg
Cuquío	Agave	590	80	78.5	6 323.57	6.32
Ixtlahuacán del Río	Agave	140	50	80	6 478.13	6.48
Zapopan	Agave	372.3	105	85	4 165.86	4.17
Tlajomulco de Zúñiga	Agave	147	73.5	95	6 488.37	6.49
Cuquío	Maíz grano	9 450	9 450	6.88	3 290.63	3.29
Ixtlahuacán del Río	Maíz grano	5 590	5 590	6.25	3 272.88	3.27
Zapopan	Maíz grano	1 2086	12 086	8.49	3 411.19	3.41
Tlajomulco de Zúñiga	Maíz grano	250	250	8.67	3 152.94	3.15
Tlajomulco de Zúñiga	Maíz grano	1 2198	12 198	6.3	3 206.79	3.21

Fuente: elaboración propia con base en Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), actualizado a 2024.

En la tabla 5, se observa un incremento de precio de agave de \$22.21 pesos por kg, y \$6.95 pesos por kg de maíz, las superficies sembradas no tuvieron cambios significativos de acuerdo a esta secretaria, siguen presentando dominio de parcelas de grano sobre parcelas de agave, ejemplo en Cuquío de 1 186 ha de agave por 11 485 ha de maíz; sin embargo, este municipio en 2015 sembró 590 ha y en 2022, 1 186 ha, aproximadamente el doble de superficie. En cuanto al

comportamiento de grano, Cuquío en 2015, con 9 450 ha y 2022 con 11 485 ha de maíz, un aumento menor de la mitad. El agave crece más significativamente que el grano básico de maíz.

Tabla 5. Análisis por distrito agrícola 2022. Agave vs maíz en el distrito Zapopan.

Municipio	Cultivo	Sembrada ha	Cosechada ha	Rendimiento Ton/ha	Precio Tonelada	Precio Pesos / kg
Cuquío	Agave	1 186	130	80.34	22208.46	22.21
Ixtlahuacán del Río	Agave	467	20	88.36	21 802.75	21.80
Zapopan	Agave	799	97	89.78	22 074.72	22.07
Cuquío	Maíz grano	11 485	11 485	6.98	6 945.01	6.95
Ixtlahuacán del Río	Maíz grano	5 820	5820	6.28	6 907.82	6.91
Zapopan	Maíz grano	11 985	11 985	7.4	6 996.36	7.00
Tlajomulco de Zúñiga	Maíz grano	14 485	14 485	6.84	7 009.74	7.01

Fuente: elaboración propia con base en Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), actualizado a 2024.

En el mismo tenor se dan ejemplos del comportamiento de superficie sembrada y cosechada y precio medio rural del agave en dos municipios: Cuquío y Zapopan, de la Región Centro, cabe hacer notar que el resto de los municipios, dicho comportamiento es muy similar. Resulta que estos dos municipios con perfil de graneros en el estado de Jalisco, contrario a Tequila, Amatitán, Arandas, Atotonilco que son tequileros, tuvieron un ascenso sorprendente de sus parcelas sembradas, en 2015, de 500 ha en Cuquío, y 400 ha en Zapopan a 1 500 ha y 800 ha para 2023, respectivamente, y sus precios de \$5.00 a \$25.00 pesos, de similar manera (Figura 9 y Figura 10); sin embargo, en algunos casos la superficie cosechada refleja una significativa caída.

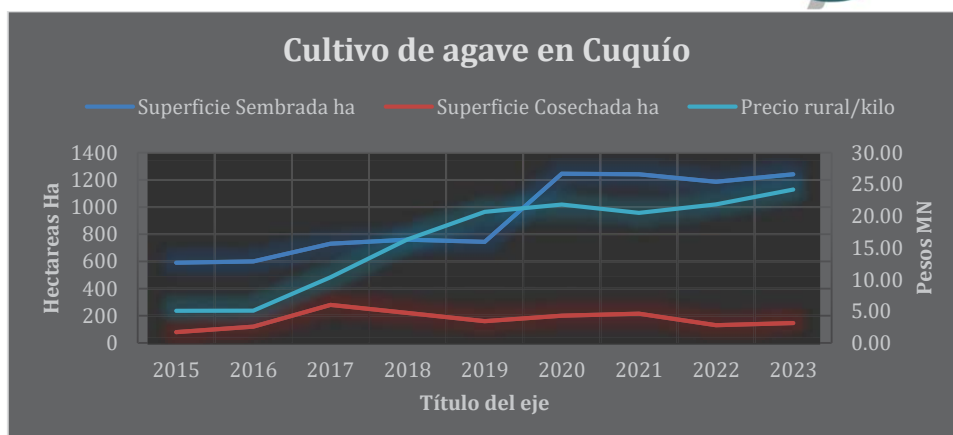


Figura 9. Superficie sembrada y cosechada y precio medio rural en Cuquío.

Fuente: elaboración propia con base en Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), actualizado a 2024.

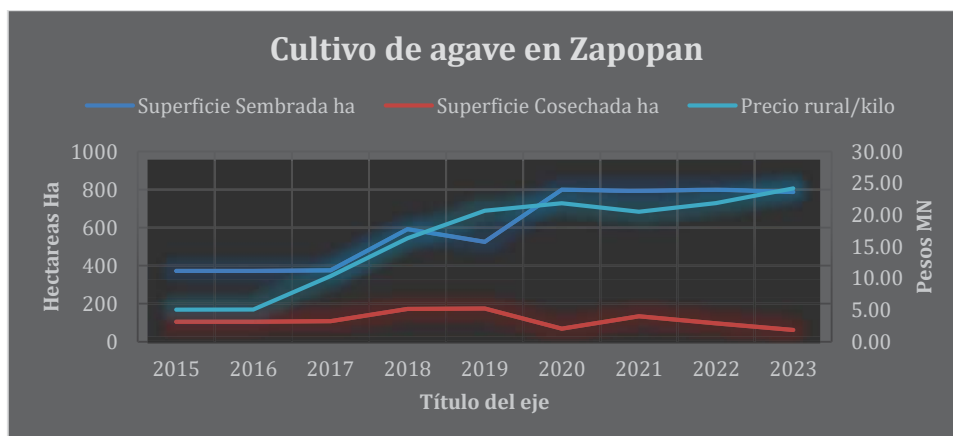


Figura 10. Superficie sembrada y cosechada y precio medio rural en Zapopan.

Fuente: elaboración propia con base en Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), actualizado a 2024.

6. Conclusiones

El agave tequilero se planta de acuerdo al precio en el mercado dependiendo de la oferta y la demanda y desde luego, de la denominación de origen, sobre todo el precio por kilogramo o

tonelada, teniendo una marcada influencia por la demanda en el extranjero con las exportaciones, generando un fenómeno social productivo, esto es, genera un impacto social.

La expansión del agave se encuentra abarcando superficies de granos básicos como son el maíz y frijol en municipios que tradicionalmente ofrecen estos productos como Cuquío y Zapopan y la mayor superficie de la Región Centro, pero además ocupa otras superficies en zonas de riego anual y semipermanente como son municipios de Villa Corona y Acatlán de Juárez, pero en mosaico donde los suelos están en pendientes elevadas, libre de inundación, de textura de suelo más arenosa o franca arenosa, de pH moderadamente alcalino.

Otro crecimiento de esta plantación fue en áreas de vegetación como son bosque y selva en alguna etapa sucesional, principalmente arbustiva, se encontraron pocos puntos con vegetación primaria de bosques de pino y encino, las parcelas en estos bosques son cuando estas se encuentran perturbadas en los estratos arbustivo o arbóreo. Algunas de estas coberturas se encuentran en relieves escarpados que son vulnerables y frágiles en cuanto a degradación física.

El aumento de superficie de agave abarca casi todos los tipos de suelos que son propios y productivos para una gran cantidad de cultivos no sólo a cultivos básicos, pero también a suelos con problemas de drenaje, acidez o alcalinidad, va de suelos de tipo Vertisol, Solonchak, o profundos como Regosol, Cambisol, Planosol y los delgados como Feozem y Litosol. Abarca diversidad de suelos, pero algunos pronostican rendimientos bajos, sobre todo donde existe mal el drenaje, acidez o alcalinidad.

Al haber extensiones de agave sobre agricultura de temporal anual y de riego como de suelos profundos podría tener alguna consecuencia en desabasto de cultivos básicos para consumo nacional y podría poner en riesgo las exportaciones y como consecuencia aumentar las importaciones de grano básicos. En otras palabras, el estudio mostró, el aumento de plantaciones de agave sobre suelos profundos y uso agrícola de temporal, por un lado hay desplazamiento de cultivos, en otro sentido, en algunos casos, con características inadecuadas como suelos sujetos a inundación por sus propiedades y por la topografía plana, si terminan sus ciclo de 7 años habrá

merma por pudrición, plagas y enfermedades; sin embargo las superficies que prosperen y logren ser cosechadas marcaran ampliación de sus requerimientos agroclimáticos por una condición de adaptación natural, lo cual será objeto de seguimiento.

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

- CEA Jalisco. (2025). Comisión Estatal del Agua Jalisco. Obtenido de Municipios y Regiones Administrativas: <https://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/municipios/>
- Consejo de Desarrollo Agropecuario y Agroindustria de Jalisco. (2023). Continúa el desplome del precio del agave. Obtenido de <https://agaves.pro/continua-el-desplome-del-precio-del-agave-azul-consejo-de-desarrollo-agropecuario-y-agroindustrial-de-jalisco-cdaaj/>
- Contreras Cruz, A. (2016). Generación de 3 medidas de ganancia para la producción de Agave Tequilana Weber en la Región de Amatitán, Jalisco. Presentación de avances de tesis. Obtenido de http://www.colpos.mx/wb_pdf/Montecillo/Economia/IIseminario/Mae/04_Ing_Ana_Leticia_Contreras.pdf Consultado 2021
- Fregoso Zamorano, B. E., Macilla Villa, O. R., Guevara Gutiérrez, R. D., Hernández Moreno, A., Figueroa Bautista, P., Can Chulim, Á., Villalvazo López, V. M. (2023). Caracterización edafológica con cultivo de agave azul (Agave tequilana Weber) en Tonaya y Tuxcacuesco, Jalisco, México. Obtenido de Terra Latinoamericana Vol. 41: <https://terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/1592>

GOB MX. (1993). DECRETO POR EL QUE SE CREA EL INSTITUTO MEXICANO DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL. Obtenido de [https://www.economia.gob.mx:https://www.economia.gob.mx/files/transparencia/D36.pdf](https://www.economia.gob.mx/files/transparencia/D36.pdf)

Google Earth. ([Fecha de Recuperado 10 abril de 2023] de s.f.). Obtenido de https://earth.google.com/web/search/Jalisco/@20.83805332,-103.60294094,1101.92916425a,556336.81432219d,35y,0h,0t,0r/data=CiwiJgokCfwMnr_rTz5AEXwfTpoqdzAGQGVLvqEbk9AIRNiNjdfOUnAQgIIAToDCgEwQgIIAEoNCP_wEQAA?authuser=0

Herrera Pérez, L., Valtierra Pacheco, E., Ocampo Fletes, I., Tornero Campante, M. A., Hernández Plascencia, J. A., y Rodríguez Macías, R. (2018). Esquemas de contratos agrícolas para la producción de Agave tequilana Weber en la región de tequila, Jalisco. Obtenido de Agricultura, sociedad y desarrollo. vol.15 no.4 Texcoco: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-54722018000400619

IIEG. (2015). Instituto de Información Estadística y Geográfica del Estado de Jalisco. Obtenido de <http://www.iieg.gob.mx/>

IIEG. (2022). Centro. Diagnóstico de la Región. Obtenido de Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco: <https://iieg.gob.mx/ns/wp-content/uploads/2022/08/12-Centro-Diagn%C3%B3stico.pdf>

INEGI (2017). Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso de suelo y vegetación, Serie VII (continuo nacional), escala 1:250 000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México.

Quezada Chico, G. (2023). Cultivos sobre "Análisis espacial del agave, condiciones edáficas y desplazamiento de cultivos tradicionales en la Región Centro de Jalisco" Informe campo [no publicado]. Universidad de Guadalajara.

- Rodríguez Gómez, G. (2007). La Denominación de Origen del Tequila: Pugnas de Poder y la Construcción de la Especificidad Sociocultural del Agave Azul. Obtenido de Scielo. Nueva antropol vol.20 no.67 México. Consultado en 2021: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-06362007000100007
- Romero Martínez, A. O. (2021). Consultado en 2023. Obtenido de La expansión del agave en Guanajuato. La denominación de origen que: <http://ru.iiec.unam.mx/5632/1/186-Romero.pdf>
- Rubio Cortez, R. (2019). El Agave: Procesos para un cultivo excelente (parte 3). Obtenido de <https://www.casasauza.com/procesos-tequila-sauza/agave-procesos-cultivo-excelente-parte-2>
- SIAP. (2022). Avance de siembras y cosechas. Obtenido de Servicio de Información agroalimenticia y pesquera: <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>
- SIAP. (2024). Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Obtenido de Anuario Estadístico de la Producción Agrícola: https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- Tena Meza, M. P., Navarro Cerrillo, R. M., Villavicencio García, R., y Contreras Rodríguez, S. H. (2023). Caracterización agroclimática del cultivo de Agave tequilana Weber en la barranca del Río Santiago. Obtenido de <https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/article/view/3085>

Servicios ecosistémicos del sur del Estado de México

Ecosystem services of the Southern State of Mexico

Luis Alfonso Flores Arteaga¹, Clarita Rodríguez Soto ^{1*} y Dolores Magaña Lona¹

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. lg.alfonsoarteaga@gmail.com, crodriguezs@uaemex.mx, dmaganal@uaemex.mx, <https://orcid.org/0009-0005-4500-3453>, <https://orcid.org/0000-0002-5684-1197>, <https://orcid.org/0000-0001-8767-3651>

*Autor(a) de Correspondencia

Recibido: 10/12/2024. Aceptado: 20/01/2026. Publicado: 05/02/2026.

Cómo citar este artículo: Flores Arteaga, L.A., Rodríguez Soto, C. y Magaña Lona, D. (2026). Servicios ecosistémicos del sur del Estado de México. *Geografía Aplicada*, 2(1), 200-230.

Resumen

A los bienes y beneficios que los ecosistemas proporcionan a las sociedades se les denomina servicios ecosistémicos (SE); constituyen un soporte fundamental del bienestar humano y del desarrollo socioeconómico a escala planetaria. No obstante, la relevancia que representa la conservación de su capacidad productiva no ha recibido el cuidado ni la atención necesaria, y su consideración como prioridad continúa siendo limitada en la agenda política nacional. En este contexto, los 15 municipios de la Región VI Ixtapan de la Sal, al sur del Estado de México, presentan un alto potencial para ofertar SE debido a su localización en la zona de transición entre las regiones neártica y neotropical. Esta condición de ecotono se expresa en una mayor riqueza, abundancia y diversidad de ecosistemas. El objetivo del presente estudio fue identificar y localizar algunos servicios ecosistémicos (SE) de la Región VI Ixtapan de la Sal al sur del Estado de México. Los SE considerados fueron:

aprovisionamiento (áreas de cultivo y floricultura), almacenamiento de CO₂, retención del suelo y turismo. Se estima que el área de estudio cuenta con una capacidad total de almacenamiento de 20,184,763 toneladas de CO₂; dentro de ella, el bosque de oyamel, con 63.33 ton/ha, presenta la cobertura forestal de mayor almacenamiento. La floricultura, con 21,404 ha, destaca entre los servicios de aprovisionamiento, mientras que la superficie destinada a la agricultura alcanza 56,523.59 ha. Aunque estas actividades generan ingresos económicos relevantes, su manejo intensivo y el uso de agroquímicos (fertilizantes y plaguicidas) se asocia con impactos socioambientales negativos. Finalmente, el turismo constituye una actividad estratégica con margen de fortalecimiento y hoy ya se promueve en Tonatico, Ixtapan de la Sal y Malinalco.

Palabras clave: mapeo de servicios ecosistémicos, diagnóstico integral, almacenamiento de CO₂, turismo.

Abstract

Ecosystem services (ES) are the goods and benefits that ecosystems provide to society, and they are the foundation of well-being and socioeconomic development on the planet. Despite their importance, they have not received the care and attention they require, nor have they been included as a priority on the current political agenda. The 15 municipalities of Region VI Ixtapan de la Sal, in the southern part of the State of Mexico, have a greater potential to offer ES due to their location between the Nearctic and Neotropical regions, representing an ecotone reflected in greater richness, abundance, and diversity of ecosystems. This study aimed to identify and locate some of the ecosystem services of Region VI Ixtapan de la Sal. The ES addressed were: provisioning (agricultural and floriculture areas), CO₂ storage, soil retention, and tourism. The study area is estimated to have the capacity to store a total of 20,184,763 tons of carbon, with the Oyamel fir forest, at 63.33 tons/ha, having the greatest capacity to provide this service. Floriculture is another provisioning service with a significant impact on the region, covering an area of 21,404 ha,

while the area dedicated to agriculture is 56,523.59 ha. Although these activities generate significant economic income, they are practiced intensively and with agrochemicals, which represent a high negative socio-environmental impact. Finally, tourism is a relevant activity in the region, with significant potential for development, and is currently being promoted in municipalities such as Tonatico, Ixtapan de la Sal, and Malinalco.

Keywords: ecosystem services mapping, comprehensive diagnosis, carbon sequestration, tourism.

1. Introducción

Los ecosistemas sostienen la reproducción de la vida y, al mismo tiempo, hacen posible una amplia gama de procesos sociales y económicos. Entre los beneficios que aportan destacan la purificación del agua, la regulación hidrológica (incluida la mitigación de inundaciones), la provisión de alimentos y materias primas, la regulación climática, la retención del suelo y el almacenamiento de dióxido de carbono (CO₂), entre otros. Estos bienes y beneficios se conceptualizan como servicios ecosistémicos (SE) y constituyen un soporte fundamental del bienestar humano y del desarrollo socioeconómico.

El concepto de SE se consolidó como un marco de referencia para articular ciencia y políticas públicas con la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (EMM) (Maes et al., 2012; García, et al., 2016). En las últimas tres décadas, el interés por comprender a los SE y, sobre todo, por diseñar políticas públicas en favor del ambiente y mecanismos de gestión que aseguren su continuidad (Bravo-Cadena y Pavón, 2024) ha crecido de manera significativa, en parte por el reconocimiento de los acelerados procesos de transformación territorial: urbanización, intensificación agropecuaria, extracción de tierras raras y cambios de usos de suelo que comprometen funciones ecosistémicas clave.

La integración de los SE en la agenda pública enfrenta barreras que van más allá de lo técnico o económico. Por un lado, existe una desconexión entre disciplinas que omite la pluralidad de valores necesarios para un bienestar colectivo (Cerdeira & Tironi, 2017). Por otro

lado, desde la geografía crítica, la degradación de los ecosistemas no se debe meramente a una "presión" abstracta, sino el resultado de configuraciones de poder que politizan el territorio para sostener rentas mediante la "acumulación por desposesión"(Gómez-Baggethun & Ruiz-Pérez, 2011; Pascual et al., 2017). De tal manera que se considera que a largo plazo el colapso ecosistémico y la pérdida de biodiversidad son el tercer riesgo más grave (Foro Económico Mundial, 2024).

La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (EEM) integró globalmente las ciencias naturales y sociales para diagnosticar el estado de los ecosistemas y sus servicios (SE), buscando fundamentar decisiones que promuevan la sustentabilidad y el bienestar humano. En este sentido, los inventarios biofísicos son el cimiento crítico para este fin: documentar la realidad material del territorio, paso indispensable para integrar posteriormente la pluralidad de valores socioculturales y dimensiones no monetarias. En este contexto a nivel mundial el estudio de los servicios ecosistémicos se ha desarrollado con base en la bibliografía consultada, en tres vertientes principales: valoración económica, diagnósticos y degradación, e identificación de los Servicios Ecosistémicos (SE) (INECC, 2020).

La Región VI Ixtapan de la Sal, que suma a 15 municipios al sur del Estado de México (Gobierno del Estado de México, 2011), posee un potencial excepcional para la provisión de SE debido a su ubicación en un ecotono entre las regiones biogeográficas Neártica y Neotropical. Esta condición de transición le otorga una notable diversidad ecosistémica; sin embargo, el territorio enfrenta una severa degradación debido al cambio de uso de suelo cobertura vegetal primaria por áreas de uso agrícola. La región destaca como la principal productora de flores a nivel nacional y de maíz a nivel estatal (SEDAGRO, 2015; SIAP, 2024). No obstante, la hegemonía de estas actividades ha configurado tensiones estructurales que merman la capacidad funcional del ecosistema. Factores de presión como la pérdida de hábitat, la erosión hídrica y la disminución de la infiltración se ven agravados por la compactación y contaminación del suelo, derivadas del uso intensivo de fertilizantes y

agroquímicos en la floricultura. Estas dinámicas representan una forma de externalización de costos socioambientales, donde la renta económica de la productividad agrícola desplaza riesgos críticos hacia la biodiversidad y los recursos hídricos de la región.

El objetivo del estudio fue identificar y ubicar los servicios ecosistémicos existentes en la región VI Ixtapan de la Sal, Edo. México, a partir de análisis y modelación espacial, que sirva como herramienta para la toma de decisiones estratégicas enfocadas, entre otras cosas, a garantizar la continuidad de los SE.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

La Región VI (Ixtapan de la Sal), Estado de México (Figura 1) se localiza en el sector sur de la entidad y forma parte de la regionalización socioeconómica que agrupa a los municipios mexiquenses en 16 regiones. En esta regionalización, la Región VI se integra por 15 municipios: Almoloya de Alquisiras, Coatepec Harinas, Ixtapan de la Sal, Joquicingo, Malinalco, Ocuilan, San Simón de Guerrero, Sultepec, Temascaltepec, Tenancingo, Texcaltitlán, Tonatico, Villa Guerrero, Zacualpan y Zumpahuacán (Gobierno del Estado de México, 2011). En términos espaciales, el área de estudio se ubica entre las coordenadas extremas 19°14'5.83" N, 99°52'28.55" O y 18°33'9.98" N, 99°57'43.02" O. Para el análisis de los servicios ecosistémicos (SE), se optó por una redelimitación hidrográfica del polígono de estudio a partir de microcuencas, en congruencia con el carácter sistémico de los SE y la interdependencia de los flujos ecológicos e hidrológicos.

Con base en el marco de microcuencas propuesto por el Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO, 2006), se consideró un universo de 62 microcuencas (propuesta original) y, para la delimitación operativa del estudio, se trabajó con 57 microcuencas agrupadas en 12 subcuencas, lo que permitió conservar una morfología territorial muy cercana a la delimitación político-administrativa (Figura 2), pero incorporando áreas funcionalmente

conectadas a la dinámica regional (incluyendo porciones colindantes del Estado de Guerrero y del Estado de Morelos). Para 2015, la población total estimada a partir de la Encuesta Intercensal asciende a 459,827 habitantes, con una densidad aproximada de 106 hab/km² (INEGI, 2016).

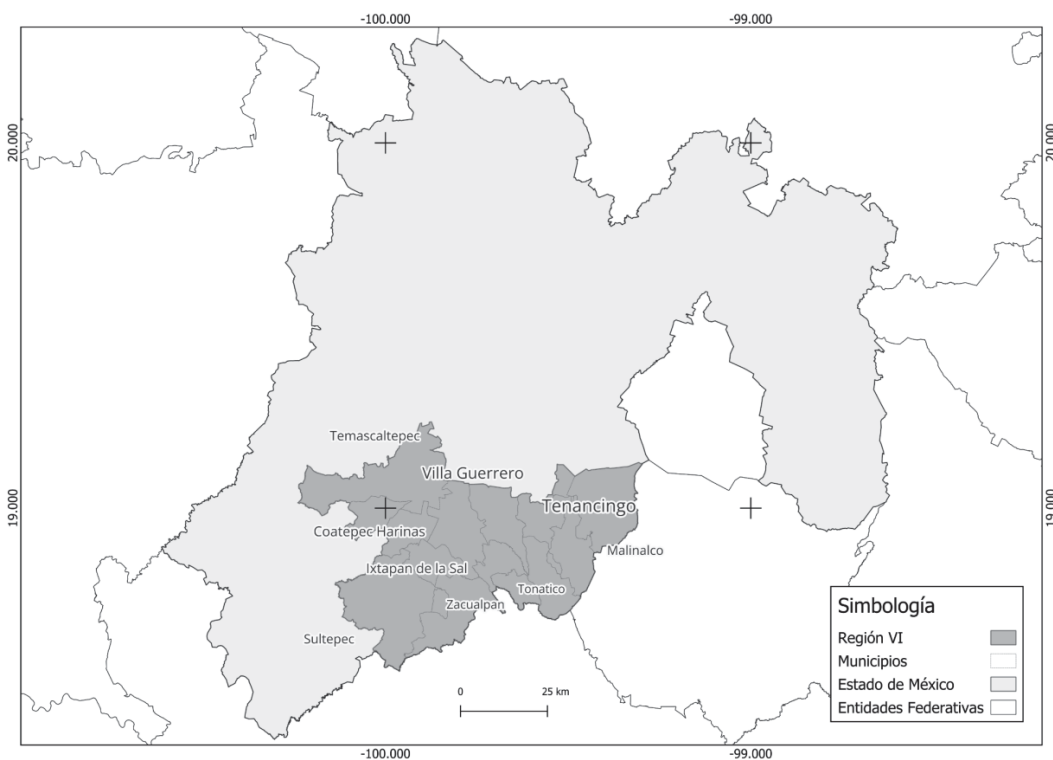


Figura 1. Área de Estudio, región VI, Ixtapan de la Sal, Estado de México.

Fuente: elaboración propia con base en Gobierno del Estado de México (2011).

Desde el punto de vista fisiográfico, la porción septentrional del ámbito regional se asocia al Eje Neovolcánico, particularmente a la subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac, mientras que hacia el sureste y el flanco occidental se reconoce la transición a la Sierra Madre del Sur, con presencia de las subprovincias Depresión del Balsas y Sierras y Valles Guerrerenses.

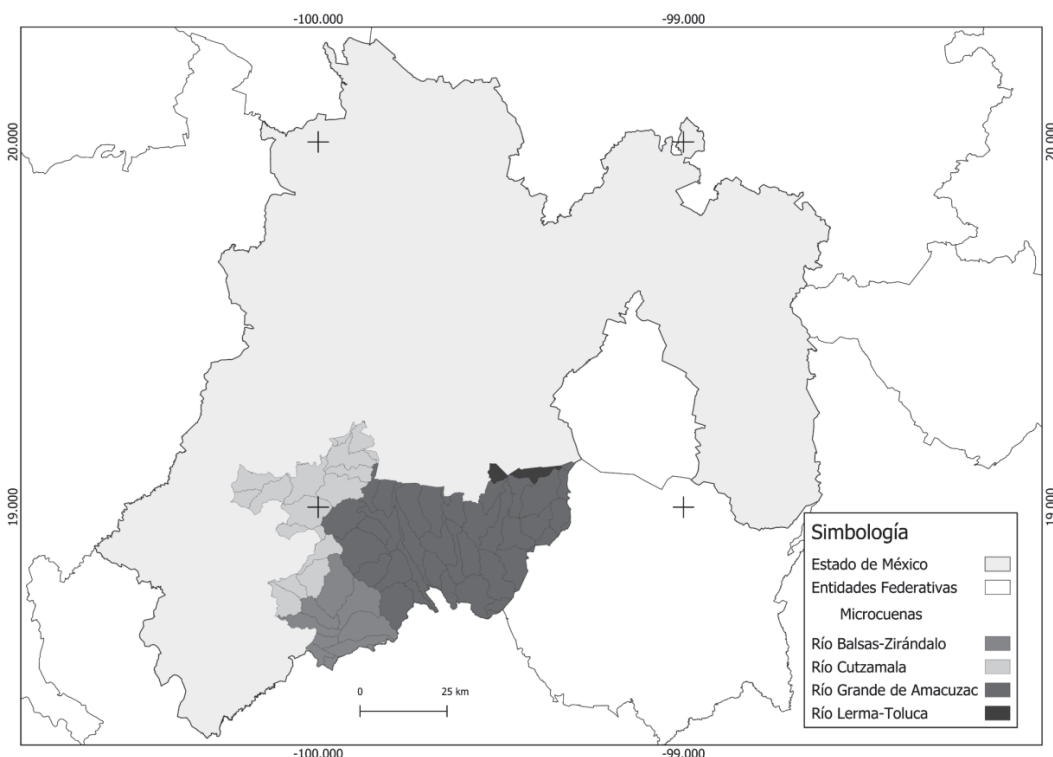


Figura 2. Área de Estudio basado en Microcuencas.

Fuente: elaboración propia con base en FIRCO (2006) e INEGI (2017).

2.2. Materiales y métodos

A continuación, se describe el procedimiento que se siguió para identificar y ubicar los SE de la región VI. Se consideraron los SE: Almacenamiento de CO₂, de aprovisionamiento (agricultura y floricultura), retención del suelo y turísticos.

Para caracterizar los ecosistemas presentes en el área de estudio, se empleó la cartografía de Uso de Suelo y Vegetación en su Serie V (INEGI, 2014). Las categorías de cobertura fueron homologadas con base en el esquema de clasificación propuesto por Burkhard y Maes (2017), con el fin de asegurar consistencia analítica entre clases de vegetación/uso del suelo y sus funciones ecológicas asociadas.

Servicios ecosistémicos de aprovisionamiento (zonas de cultivos y floricultura): La delimitación de zonas de cultivo y floricultura se realizó mediante la integración de fuentes: i) imágenes satelitales Sentinel-2A (abril de 2016), ii) la cartografía de USV Serie V (INEGI, 2014) y iii) la Frontera Agrícola del SIAP, versión II (2019).

Las imágenes Sentinel-2A se procesaron en QGIS mediante el complemento Semi-Automatic Classification Plugin, aplicando tratamiento digital y clasificación supervisada con base en firmas espectrales, a fin de identificar coberturas agrícolas y su distribución espacial en la región.

Servicio ecosistémico Almacenamiento de CO₂: La estimación del carbono almacenado en bosques y selvas se llevó a cabo con base en los resultados reportados por Mondragón (2017), quien, con base en la metodología de Rojas et al. (2005), desarrolló un muestreo sistemático estratificado por conglomerados, apoyado en una malla de puntos con separación regular de 2.5 km. Para la estimación de de las toneladas almacenadas, se consideraron ecuaciones derivadas del Segundo Estudio Dasométrico del Estado de México (SEDEMEX, 1990), que agrupan especies forestales dominantes de acuerdo con su hábito de crecimiento y morfología. En el caso de selvas bajas, el volumen se calculó con modelos del propio SEDEMEX (1985–1990). La biomasa se estimó conforme a la ecuación propuesta por Rojas et al. (2005); para la densidad de la madera se utilizaron valores promedio reportados en el inventario forestal, y para el componente espacial se vinculó la información a las clases de bosque y selva (INEGI Serie V) mediante asignaciones en PostGIS con base en la siguiente fórmula.

Ecuación 1. Biomasa

$$B = V * d$$

Donde:

B = Biomasa

V= Volumen (Existencias reales en m³ V.T.A.)

d = Densidad de la madera

Para estimar la densidad de la madera se consideraron los datos de densidad promedio de las especies reportadas en el Inventario Forestal. Para el volumen se consideraron los resultados de la estimación de carbono almacenado en bosques y selvas del Estado de México reportados por Mondragón (2017) (Tabla 1).

Tabla 1. Volumen generado en cada tipo de bosque del Estado de México.

<i>Tipo de Bosque</i>	Ton/Ha
Oyamel	63.36
Pino	31.48
Pino-Encino	31.39
Encino	28.39
Bosque mesófilo de montaña	26.64
Encino -Pino	21.71
Selva baja Caducifolia	3.24

Fuente: elaboración propia con base en Mondragón (2017).

Servicio ecosistémico retención de suelo: Se representó a través del mapa de erosión hídrica potencial, este se puede definir como *“el resultado de la combinación de factores cómo la precipitación, el escurrimiento, la textura del suelo y la topografía (pendiente). Para determinar la pérdida de suelo en toneladas por hectárea al año se aplicó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo”* (USLE, por sus siglas en inglés; Wischmeier y Smith 1965, 1978; Montes- León 2011) (Ecuación 2).

Ecuación 2: Erosión hídrica potencial

$$A_{\text{potencial}} = R \times K \times LS$$

Donde:

Donde:

A = tasa de erosión anual (ton/ha.año).

R = factor de erosividad de la lluvia (MJ.mm/ha.h).

K = factor de erodabilidad del suelo (ton.h/MJ.mm).

LS = factor topográfico longitud-pendiente.

Factor R (erosividad de lluvia). Representa la energía potencial de la lluvia y el escurrimiento asociado, es el componente climático que expresa el potencial erosivo de la lluvia (Montes-León, 2011). Para su estimación se utilizó el algoritmo de GRASS GIS Rainfall erosivity index, aplicado al ráster de precipitación total anual elaborado por Gómez-Albores (2017). Este enfoque ofrece mayor detalle espacial y eficiencia operativa frente a regionalizaciones nacionales más generales, como la metodología simplificada propuesta por Ortiz-Solorio y Pérez-García (2009).

Factor K (erodabilidad del suelo). El factor K expresa la susceptibilidad intrínseca del suelo a la erosión bajo condiciones de lluvia y escurrimiento. Se estimó mediante el algoritmo GRASS GIS USLE soil erodibility, incorporando información proveniente de la cartografía edafológica del INEGI, de modo que el parámetro refleja variaciones espaciales en textura y propiedades relevantes para la erosión.

Factor LS (longitud y pendiente). Integra la longitud (L) desde el origen del escurrimiento hasta el punto donde disminuye la pendiente (por sedimentación) o donde el flujo se concentra en un canal definido, y el gradiente de pendiente (S) (Montes-León, 2011). Para su cálculo se utilizaron Modelos Digitales de Elevación SRTM v3.0 (NASA, 2013), a partir de los cuales se derivaron pendientes y métricas topográficas. Posteriormente, mediante la calculadora ráster de qgis se implementaron las expresiones sql necesarias para la conversión de unidades y la obtención secuencial de L, S y finalmente LS.

Finalmente, el resultado de la erosión potencial hídrica se reclasificó en rangos de severidad con base en la propuesta de la FAO (1980), desde categorías normales (<0.5 ton/ha·año) hasta muy severas (50–200 ton/ha·año).

Servicio ecosistémico turismo: Para la identificación de los sitios turísticos más representativos, se realizó una revisión bibliográfica y consulta web, considerando modalidades de turismo general, ecoturismo, turismo religioso y turismo alternativo. La

selección se restringió a sitios en los que la experiencia y la oferta turística dependieran de manera directa de algún servicio ecosistémico de provisión (por ejemplo, paisajes asociados a coberturas naturales, recursos hídricos o elementos bioculturales ligados al entorno), con el fin de mantener coherencia entre atractivo turístico y soporte ecológico.

3. Resultados

3.1. Distribución de los ecosistemas

La Región VI presenta una alta diversidad ecosistémica, asociada a su localización en un ecotono (Figura 3). Los bosques de coníferas destacan por su mayor capacidad para proveer servicios ecosistémicos, en particular, almacenamiento de CO₂, dispersión de contaminantes, retención de suelo, hábitat, suministro de agua, servicios culturales, genéticos y de materias primas.

No obstante, los ecosistemas dentro del área de estudio enfrentan presiones significativas derivadas de las actividades económicas, en especial debido a la floricultura que se destaca como factor de presión dominante. Por su carácter intensivo, se asocia con pérdida, contaminación y compactación del suelo, además de pérdida de hábitat, cambios de uso de suelo agrícolas a florícolas y remoción de vegetación en laderas con pendientes pronunciadas, entre otros efectos. (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2024).

Dentro del conjunto de coberturas, el bosque de niebla o bosque mesófilo de montaña adquiere relevancia por su capacidad de soportar SE como hábitat y regulación climática, así como de la preservación de riqueza genética; es importante mencionar que es uno de los ecosistemas más amenazados del país (aproximadamente el 0.9% del territorio nacional) y que, en la región, representa 11,615.4 ha.

Un hallazgo adicional es el aumento de la superficie de la selva baja caducifolia (sureste del área de estudio), este fenómeno se identificó al comparar su extensión en dos series de uso

de suelo (INEGI, versiones III y IV). Esta ganancia se puede deber a un cambio de actividades económicas primarias hacia terciarias.

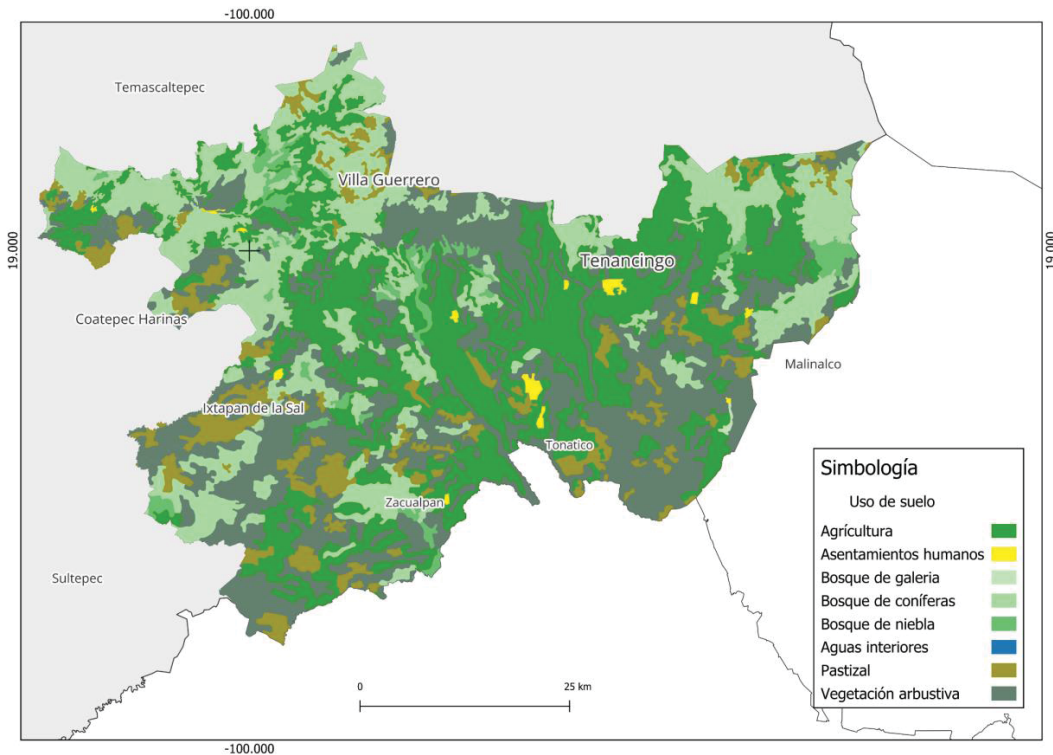


Figura 3. Mapa de Ecosistemas en el área de estudio, región VI, Ixtapan de la Sal, Estado de México.

Fuente: elaboración propia, con base en la Serie V del INEGI.

Finalmente, las zonas selváticas son reconocidas como fuente de materias primas para usos domésticos y plantas medicinales. En términos funcionales, se les atribuyen servicios vinculados con ciclo de nutrientes, regulación hídrica, prevención de erosión y formación de suelos, así como el soporte a polinizadores claves para conservación genética y producción de alimentos.

3.2. Servicio ecosistémico aprovisionamiento (alimentación y materias primas)

En la Región VI se registran 72,581 terrenos destinados a la agricultura, con una superficie conjunta de 138,508.39 ha (INEGI, 2016) (Tabla 2). A escala regional se observa una consolidación como cultivo principal el maíz de grano, con más de 28,472 ha, por encima de la avena forrajera (5,526 ha) y del aguacate (3,162 ha).

Tabla 2. Producción agrícola de los cultivos principales por municipio, Región VI (Ha cosechadas).

	Maíz de grano	Avena forrajera	Aguacate	Pastos	Durazno	Chícharo	Frijol	Cebolla	Fresa
<i>Almoloya de Alquisiras</i>	2,756	320	492	*	*	*	*	*	*
<i>Sultepec</i>	4,331	*	*	4,510	190	*	*	*	*
<i>Coatepec de Harinas</i>	3,176	2,762	1,796	*	*	*	*	*	*
<i>Temascaltepec</i>	4,935	930	*	2,090	*	*	*	*	*
<i>Ixtapan de la Sal</i>	1,075	*	*	*	*	*	260	340	*
<i>Joquicingo</i>	1,982	*	110	*	*	215			*
<i>Tenancingo</i>	2,114	*		*	*		232	360	*
<i>Malinalco</i>	3,205	*	219	*	*	347	*	*	*
<i>Villa Guerrero</i>	1,490	*	224	*	*	*	*	*	152
<i>Ocuilan</i>	3,410	1,280	*	*	*	1,810	*	*	*

Fuente: elaboración propia con base en SEDAGRO (2015).

En este sentido, la floricultura muestra una tendencia de expansión relevante. A causa de programas de expansión ocurridos a partir de 1994, asociado a la política de reconversión de cultivos del Programa Nacional de Modernización del Campo (Rivera Herrera, 2015), y a un proyecto integral de SEDAGRO (2001–2002) para fortalecer comercialización y producción florícola (Orozco, 2007), este proceso de expansión ha derivado en efectos particularmente negativos para la salud en municipios como Villa Guerrero y Tenancingo.

Actualmente, la producción florícola nacional se concentra de forma destacada en la cuenca florícola del alto Amacuzac, donde Villa Guerrero, Coatepec de Harinas y Tenancingo concentran parte sustantiva de la producción principalmente del crisantemo, clavel, rosa gruesa y gladiola (Figura 4), con un valor aproximado reportado de \$2,919,470,000 pesos (SEDAGRO, 2015). En el área de estudio, el total destinado a floricultura es de 21,404 ha, mientras que la agricultura abarca 56,523.59 ha (Figura 4).

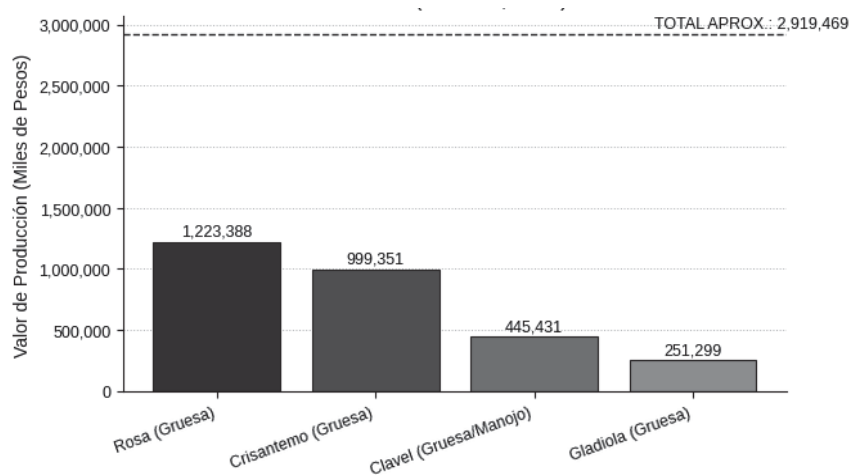


Figura 4: Valor económico de la producción florícola en el área de estudio.

Fuente: SEDAGRO (2015).

En el área de estudio, el total destinado a floricultura es de 21,404 ha, mientras que la agricultura abarca 56,523.59 ha (Figura 5).

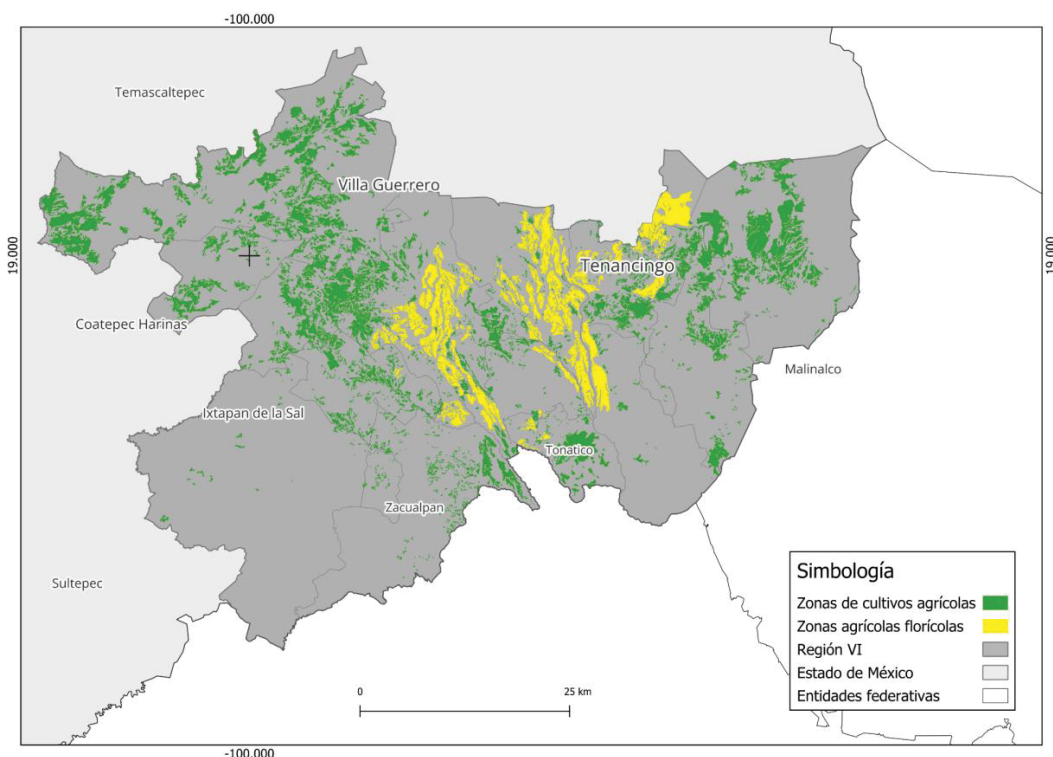


Figura 5. Distribución de los Servicios Ecosistémicos de Alimentos y materias primas, Región VI Ixtapan de la Sal, Estado de México.

Fuente: elaboración propia.

3.3. Servicio ecosistémico Almacenamiento de CO₂

Se estima que la capacidad de almacenamiento de CO₂ en la Región VI alcanza 20,184,763 toneladas. Destaca el bosque de oyamel como la cobertura con mayor capacidad por unidad de superficie (63.33 ton/ha), mientras que encino y pino registran valores cercanos a 31.4 ton/ha; pese a ello, por su extensión, el encino-pino acumula 1,832,809 toneladas, superando el total del oyamel. En el extremo opuesto, la selva baja caducifolia presenta 3.24 ton/ha y un total acumulado de 27,326 toneladas (Tabla 3, Figura 6).

Tabla 3. Total de toneladas de carbono almacenado en bosques y selvas de la región VI.

Tipo de Bosque	Ton/Ha.	Hectáreas	Total, de Toneladas de Carbono Almacenado
Selva B. Caducifolia	3.24	27,327	88,539
Encino-Pino	21.71	24,990	542,513.3
BMDM	26.64	11,615.4	309,435.5
Encino	28.39	53,568	15'207,889
Pino-Encino	31.39	58,324.6	1'830,809.7
Pino	31.48	42,922.4	1'351,197.3
Oyamel	63.36	13,484.5	854,379.5
			2'018,4763.3

Fuente: elaboración propia con base en la Serie V (INEGI 2014).

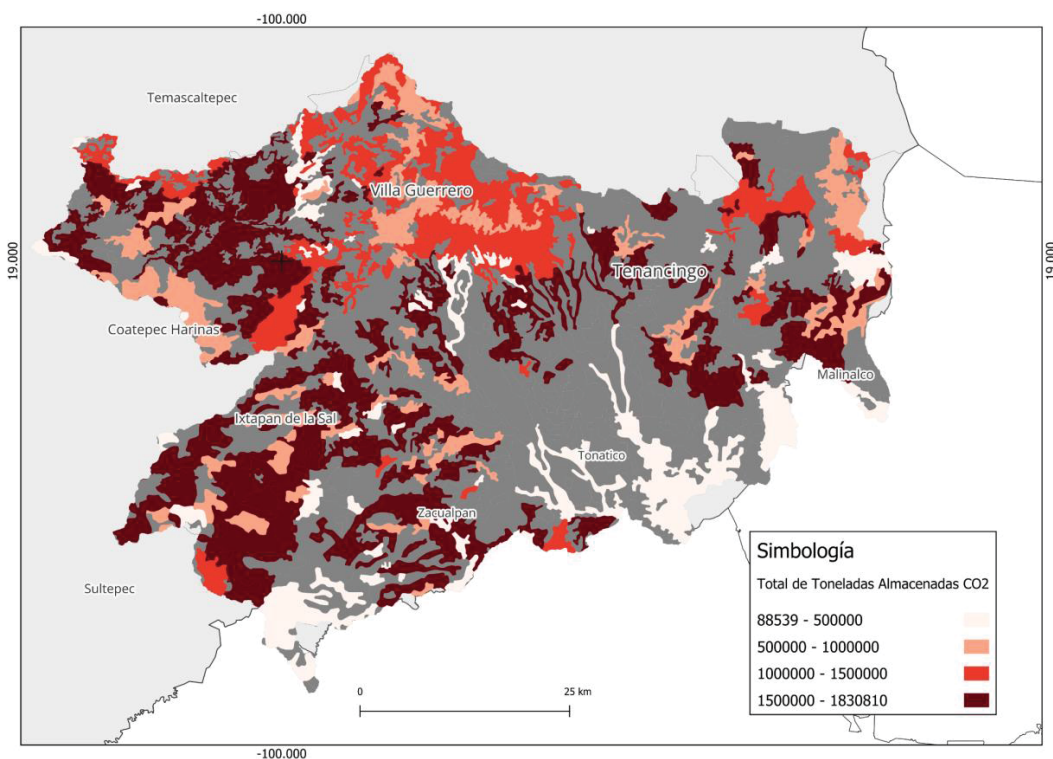


Figura 6. Mapa de almacenamiento total de CO₂ por tipo de vegetación, Región VI, Ixtapan de la Sal, Estado de México.

Fuente: elaboración propia con base en Uso de Suelo y Vegetación INEGI versión V.

En términos espaciales, la mayor concentración del servicio se localiza hacia el poniente regional: Sultepec, Temascaltepec y Zacualpan en relación con áreas protegidas y el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca; en contraste, en el entorno de la cuenca florícola de Coatepec de Harinas se reporta una disminución significativa del servicio.

3.4. Servicio ecosistémico retención de suelo (erosión hídrica potencial)

La pérdida de cobertura vegetal se identifica como un factor determinante en la pérdida de suelo; a ello se suman procesos de contaminación y compactación asociados a floricultura y agricultura, con repercusiones socioeconómicas (p. ej., rendimiento parcelario, seguridad alimentaria) y ecológicas (p. ej., pérdida de hábitat)

La distribución regional es heterogénea (Figura 7): el norte y sureste muestran mayor retención, y se observa una relación entre densidad de cobertura vegetal y mayor capacidad de retención; sin embargo, la pendiente del terreno juega un papel importante en el patrón, pues hay zonas planas con erosión normal aun con cubiertas menos densas. En contraparte en la cuenca florícola predominan valores bajos, explicados por la escasa inclinación y presencia de invernaderos.

Es importante mencionar que la actividad florícola se está expandiendo a los alrededores de la cuenca florícola, en zonas con erosión potencial hídrica mayor, generando un potencial menor para el éxito de este tipo de cultivo en las condiciones en las que actualmente se desarrolla.

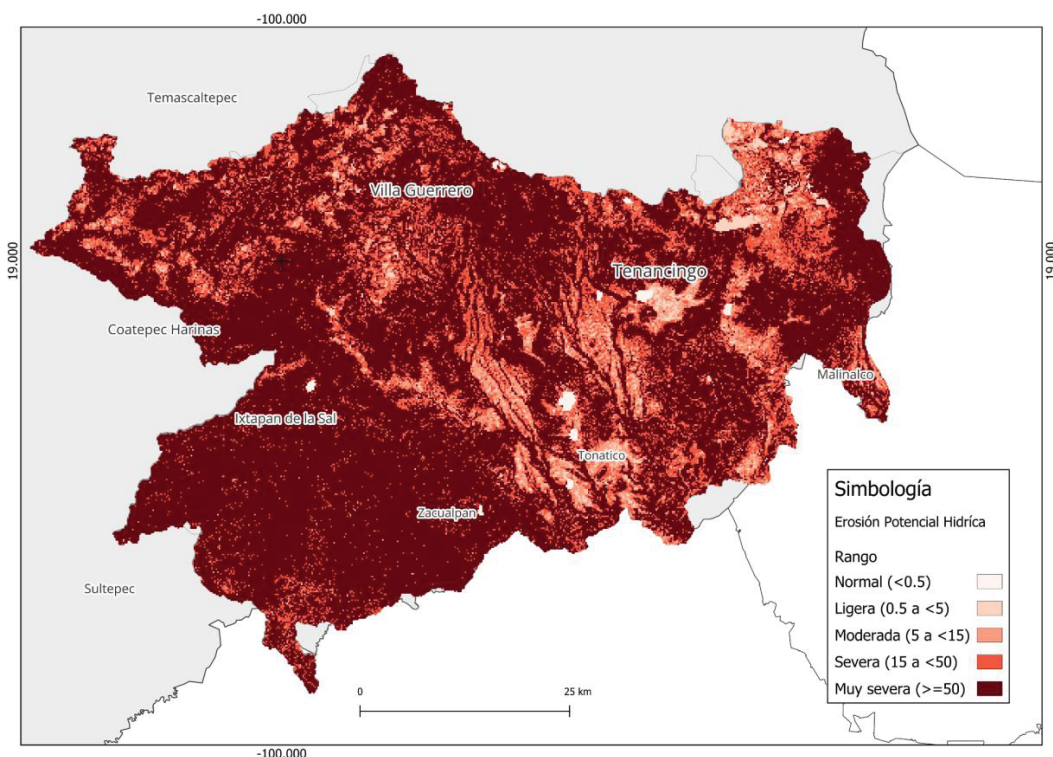


Figura 7. Mapa de la erosión potencial hídrica en la región VI Ixtapan de la Sal, Estado de México.

Fuente: elaboración propia.

3.5. Servicio ecosistémico turismo

El turismo se concentra en el eje Ixtapan de la Sal–Tonatico (Figura 8), reconocidos como Pueblos Mágicos, donde destacan servicios recreativos asociados a balnearios de aguas termales. Se identifican zonas emergentes hacia el entorno del Nevado de Toluca y hacia el sur y este regional, donde se perfila el ecoturismo y turismo de montaña (corredor Tonalico–Taxco).

En el municipio de Tonalico sobresalen las Grutas de la Estrella como atractivo de alto valor por su paisaje subterráneo, formaciones de estalactitas y estalagmitas, infraestructura de

visita y actividades como rappel; se describe una longitud aproximada de 2 km y aspectos culturales atribuidos a periodos prehispánicos.

El componente religioso-cultural se expresa en sitios como Chalma y el Desierto del Carmen, y se mencionan celebraciones regionales y patrimonio construido (ex-convento agustino del siglo XVI). Asimismo, la zona arqueológica de Malinalco se incorpora como referente cultural-territorial de gran relevancia estatal.

Como parte de los atractivos culturales de la región, no puede dejar de considerarse la zona arqueológica de Malinalco. En este sitio se encuentra un monolito de piedra (el cuauhcalli), que representa la división de tres planos del universo: el inframundo, el mundo terrenal y el supramundo (Zúñiga, 2023).

La ruta turística para esta región es muy rica en atractivos tanto naturales como culturales (Figura 8). Los servicios ecosistémicos para el turismo son potencialmente una oportunidad para el desarrollo de las comunidades, considerando que, por el clima, se dan todo tipo de alimentos que dan característica a su gastronomía. Sin embargo, algunos de estos atractivos pueden estar en riesgo de desaparecer en un futuro, por su dependencia de la eficiencia en la recarga de agua que aporta el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, que han sido impactadas por la agricultura y la tala ilegal en las últimas décadas, sumada al deterioro paisajístico derivado del cambio climático.

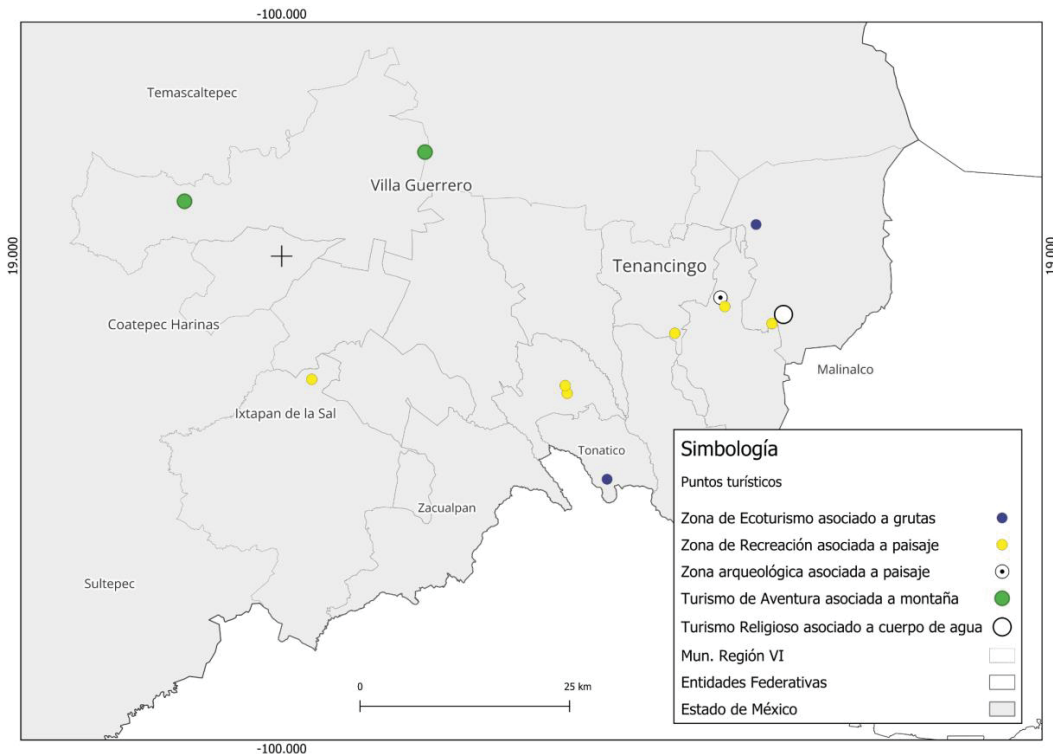


Figura 8. Mapa de Servicios ecosistémicos culturales (Turismo), Región VI Ixtapan de la Sal, Estado de México.

Fuente: elaboración propia.

4. Discusión

4.1. Distribución de los ecosistemas

Bajo diversos escenarios de cambio climático, se señala una posible reducción significativa del bosque de oyamel (*Abies religiosa*): hasta 80% de disminución con modelos Had y ECHAM, y 60% con GFDL; para *Pinus montezumae* se reporta una disminución de 10.59% en escenarios futuros.

En conjunto, se sugiere un incremento de climas cálidos (húmedos y secos), con mayor presencia en zonas bajas del sur regional, donde predominan selvas bajas. En contraste,

climas templados fríos y semicálidos serían más sensibles e incluso podrían desaparecer en escenarios pesimistas, con afectaciones potenciales en el entorno del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca. Se ha planteado, además, que la vegetación tropical seca y muy seca podría ganar terreno frente a bosques, reduciendo áreas de distribución potencial de especies de climas templados húmedos y fríos, con impactos sobre densidad arbórea, dispersión, migración y adaptación.

Según lo señalado, en ecosistemas selváticos las principales presiones se asocian al cambio de uso de suelo hacia agricultura o ganadería, además de extracción de flora silvestre ornamental y madera con fines económicos, lo que compromete su funcionamiento y continuidad de servicios ambientales. A ello se suma que en la región existen especies en categorías de riesgo conforme a la NOM-059-SEMARNAT-2010.

4.2. Servicio ecosistémico aprovisionamiento (alimentación y materias primas)

Se recupera el argumento de que, si bien existe producción suficiente de alimentos, persisten desigualdades en su distribución; para México se reporta un desperdicio del 37% (más de 10 millones de toneladas), con implicaciones directas para la seguridad alimentaria (SEDESOL, 2017). En esta línea, la producción de alimentos, aunque reconocida como servicio ecosistémico opera también como un factor de presión sobre otros servicios debido al uso extensivo e intensivo del suelo.

En términos prospectivos, escenarios de cambio climático plantean que aumentos de temperatura podrían desplazar condiciones favorables para agricultura de cereales hacia altitudes mayores (por encima de 2,000 msnm), aunque el desarrollo de cultivos seguiría condicionado por variabilidad hidrometeorológica y eventos extremos (Conde, 2000).

Se retoma también que, de acuerdo con IPBES, la agricultura y la floricultura se comprenden como servicios de provisión, pero constituyen actividades de alto impacto ambiental

regional; de ahí la necesidad de transitar hacia prácticas más sustentables. En particular, se reconoce la complejidad socioeconómica de la floricultura y la dificultad de construir alternativas de corto plazo, subrayando la necesidad de procesos de concientización y estrategias técnicas y comerciales para opciones productivas de menor impacto (Domínguez, 2024).

4.3. Almacenamiento de CO₂

Se discute que el almacenamiento de CO₂ ha cobrado visibilidad por esquemas de pago por servicios ambientales (Pro-árbol y el Programa de Desarrollo Forestal Sustentable para el Bienestar de CONAFOR, 2023). Sin embargo, se critica que estos instrumentos tienden a priorizar la remediación sobre la concientización comunitaria y que el bajo monto pagado puede desincentivar la conservación, además de riesgos de captura por actores vinculados a tala ilegal.

4.4. Retención de suelo

Se enfatiza el papel del suelo como componente estructural del funcionamiento ecosistémico de ciclos biogeoquímicos y captura de agua con tiempos de formación largos frente a procesos de degradación acelerados. La degradación potencial se entiende como pérdidas o transporte de partículas bajo escenarios de baja cobertura vegetal, intensificadas por lluvia, escurrimiento, erodabilidad y relieve. En este marco, se reitera la relevancia de la cobertura vegetal y los impactos productivos y ecológicos asociados a su pérdida, así como los efectos vinculados a la floricultura y agricultura.

4.5. Servicio ecoturístico turismo

Se plantea que la ruta turística regional es particularmente rica en atractivos naturales y culturales, con potencial para fortalecer economías comunitarias; sin embargo, se advierte el riesgo de deterioro por dependencia de zonas de recarga cercanas al Nevado de Toluca y por cambios climáticos que afectarían precipitación, temperatura y, con ello, paisajes

turísticos. Finalmente, se reconoce que, aunque el estudio se enmarca en Servicios Ecosistémicos, emergen enfoques como Contribuciones de la Naturaleza a las Personas (CNP), que amplían la noción de bienestar y valoran distintos sistemas de conocimiento (indígena, local y científico), relevantes para interpretar bienes culturales como el turismo.

5. Conclusiones

El Estado de México, por su posición de transición fisiográfica y climática, concentra una diversidad ecosistémica notable, en particular, en su zona sur y sureste, las cuales conservan extensas superficies forestales que resultan estratégicas a escala estatal por su papel en la regulación hídrica, la estabilidad de laderas y el almacenamiento de carbono. Sin embargo, estas coberturas se encuentran bajo presión creciente debido a la expansión y reconfiguración de actividades económicas especialmente la floricultura y la agricultura que han intensificado el cambio de uso del suelo y la fragmentación del paisaje.

En este contexto, el turismo constituye un componente central de la economía regional, con localidades consolidadas como: Ixtapan de la Sal y Tonalá, donde balnearios y parques acuáticos dependen de manera directa de la disponibilidad y calidad del agua. Esta dependencia revela un rasgo clave del metabolismo territorial: el bienestar recreativo y el ingreso local se sostienen en procesos ecológicos que ocurren “aguas arriba”. La pérdida de zonas de captación, la disminución de la cubierta vegetal y la compactación del suelo no solo alteran la recarga, sino que incrementan los escurrimientos y la erosión, afectando la seguridad hídrica y, por extensión, la estabilidad de la oferta turística.

De forma transversal, los cambios de uso de suelo de forestal a usos orientados al aprovechamiento económico han implicado perturbación y pérdida de los diversos ecosistemas respecto a su capacidad para sostener servicios ecosistémicos indispensables para el desarrollo regional. No obstante, más que un “déficit ambiental” aislado, el patrón observado expresa una tensión socioespacial: la región produce beneficios (alimentos, flores, turismo) en el corto plazo, pero transfiere costos ambientales en el mediano y largo

plazo, y con frecuencia los desplaza territorialmente. Esto se manifiesta con claridad en la cartografía de retención de suelo, donde las zonas agrícolas, muestran mayor detrimento del servicio, mientras que se reduce simultáneamente la capacidad del almacenamiento de carbono.

En términos sistémicos, la cadena de efectos es acumulativa: al sustituir coberturas forestales por zonas productivas intensivas, se reduce la retención del suelo y la capacidad de almacenamiento de carbono; con ello se agravan condiciones vinculadas a la variabilidad climática y aumenta la vulnerabilidad ante eventos hidrometeorológicos que impactan la productividad agrícola, principalmente la de subsistencia. Así, la provisión de alimentos mediante agricultura intensiva puede convertirse en el mediano plazo en un factor que ponga en riesgo a diversas comunidades que practican la agricultura de subsistencia, comprometiendo así la seguridad alimentaria de autoconsumo; en otras palabras, la degradación ambiental se traduce en vulnerabilidad socioeconómica diferencial.

Desde una perspectiva de geografía crítica, este proceso no es neutro: implica relaciones de poder en el territorio, decisiones de política pública y asimetrías en quién se beneficia y quién asume los riesgos. La “vocación productiva” no se despliega únicamente por condiciones naturales, sino por incentivos, mercados, infraestructura y programas institucionales que favorecen ciertas formas de apropiación de los servicios ecosistémicos. Esto puede leerse como una forma de externalización territorial: los costos (erosión, pérdida de recarga, degradación de suelos), afectan con mayor intensidad a comunidades con menor capacidad de adaptación. Ante ello, la región requiere estrategias que no se limiten a la remediación posterior, sino que aborden las causas estructurales del deterioro. La concientización y la información ambiental constituyen bases necesarias para la participación social, pero deben complementarse con instrumentos de gobernanza territorial capaces de regular usos del suelo y prácticas productivas.

6. Agradecimientos

Al Laboratorio Nacional Conahcyt de Tecnologías de la Información Geoespacial para los Sistemas Socioecológicos Resilientes.

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

- Balvanera, P., Cotler, H., ... [últimos autores]. (2009). Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos. En Conabio (Ed.), Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio (pp. 185-245). Conabio.
- Brea, J. D. y Balocchi, F. (2010). Proceso de erosión y sedimentación en cauces y cuencas. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
- Bravo-Cadena, J. y Pavón, H. N. (2024). La importancia de los servicios ecosistémicos. Ciencia, 75(4), 64-69.
- Burkhard, B. and Maes, J. (2017). Mapping ecosystem services. Pensoft Publishers.
- Carpenter, S. R., Bennett, E. M. and Peterson, G. D. (2006). Scenarios for ecosystem services: An overview. Ecology and Society, 11(1), 29.
- Cerda, C. y Tironi, A. (2017). La evaluación no monetaria de los servicios ecosistémicos: perspectivas para la gestión sostenible del territorio. Luna Azul, (45), 332-355.
<https://doi.org/10.17151/luaz.2017.45.17>

- Challenger, A., Dirzo, R., ... [últimos autores]. (2009). Factores de cambio y estado de la biodiversidad. En Conabio (Ed.), Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio (pp. 37-73). Conabio.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2023). Programa de Desarrollo Forestal Sustentable para el Bienestar. México.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (n.d.). Diversidad biológica de México: Estudio de país, antecedentes. Recuperado de http://www.conabio.gob.mx/institucion/cooperacion_internacional/doctos/epcomienzo.html
- Conde, C., Ferrer, R. M. y Liverman, D. (n.d.). Estudio de la vulnerabilidad de la agricultura de maíz de temporal mediante el modelo CERES-MAIZE. Recuperado de http://ccaunam.atmosfcu.unam.mx/editorial/libros/cambio_climatico/agricultura.pdf
- Costanza, R., D'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neil, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P. and van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, 253-259. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Daily, G. C. (Ed.). (1997). *Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems*. Island Press.
- De Groot, R., Alkemade, R., Braat, L., Hein, L. and Willemen, L. (2010). Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*, 7, 260-272.
- Domínguez, G.L.G. (2024). Floricultura intensiva y deforestación en Villa Guerrero, Estado de México. Un análisis desde las políticas públicas y la gobernanza. Tesis. El colegio de la Frontera Norte. México.

- Eade, D. O. and Moran, D. (1996). Spatial economic valuation: Benefit transfer using geographical information systems. *Journal of Environmental Management*, 48, 97-110.
- FAO. (1980). Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. FAO. Roma. 86 p.
- FIRCO (2006). Modelo de Microcuencas: Aprovechamiento de Recursos y Desarrollo Sustentable. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2013/04/lecciones_aprendidas_del_manejo_de_cuencas_en_mexico.pdf.
- Flores-López, H. E., Ramírez-Vega, H., Byerly-Murphy, K. F., Ruiz-Corral, J. A., Martínez-Sifuentes, J. A., Díaz-Mederos, P. y Alemán-Martínez, V. (2003). Estimación de escurrimiento superficial en la cuenca El Jihuete, México. *Terra Latinoamericana*, 21(3), 389-400.
- Foro Económico Mundial. (2024). Global Risks Report 2024. Recuperado de <https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2024/digest/>
- Francisco-Nicolás, N., Turrent-Fernández, A., Oropeza-Mota, J. L., Martínez-Menes, M. R. y Cortés-Flores, J. I. (2006). Pérdida de suelo y relación erosión-productividad en cuatro sistemas de manejo del suelo. *Terra Latinoamericana*, 24(2), 253-260.
- García Rodríguez, C., Curetti, G., Garegnani, G., Grillo, G., Pastorella, F. y Paletto, A. (2016). La valoración de los servicios ecosistémicos en los ecosistemas forestales: Un caso de estudio en los Alpes italianos. *Bosque*, 37(1), 41-52.
- Gobierno del Estado de México. (2011). Programa de Desarrollo Regional, Macro Región IV Sur, Región VI, Ixtapan de la Sal. Recuperado de <https://transparenciafiscal.edomex.gob.mx/sites/transparenciafiscal.edomex.gob.mx/files/files/Programas%20Regionales%202006-2011/M%20IV%20-%20R%20X%20Tejupilco.pdf>

- Gobierno del Estado de México, Comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna. (2016). Áreas Naturales Protegidas del Estado de México. Recuperado de http://conacyt.gob.mx/cibiogem/images/cibiogem/sistema_nacional/documentos/ANPL/Mex/SUPERFICIE_PARQUES_JUNIO_2014.pdf
- Gómez-Baggethun, E. and Ruiz-Pérez, M. (2011). Economic valuation and the commodification of ecosystem services. *Progress in Physical Geography*, 35(5), 613–628. <https://doi.org/10.1177/0309133311421708>
- Hernández-Ramírez, C., Bonales Valencia, J. y Ortiz Paniagua, C. F. (2014). Modelos de vulnerabilidad agrícola ante los efectos del cambio climático. *CIMEXUS*, 9, 33-48.
- Instituto Nacional de Energía y Cambio Climático (INECC). (2020). Revisión y análisis de documentos sobre valoración económica de los servicios ecosistémicos de México de 1990 a 2019. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2014). Guía para la interpretación de cartografía: Uso del suelo y vegetación: escala 1:250,000: Serie V. México: INEGI.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016). Encuesta Intercensal 2015. México: INEGI.
- Maes, J., Egoh, B., Willemsen, L., Draper, C., Schägner, J. P., Aiello, R., Zulian, G., Villareal, S. S., Braat, L. and Lavalle, C. (2012). Mapping ecosystem services for policy support and decision making in the European Union. *Ecosystem Services*, 1(1), 31-39. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.06.004>
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being*. Island Press.
- Ortiz-Solorio, C. A., & Pérez-García, J. (2009). El Mapa Nacional de Erosión Potencial de México: Metodología y resultados preliminares. *Terra, Nueva Época*, 27(1), 1-18. SciELO México.

- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SIAP). (2019). Versión II Frontera Agrícola (Atlas). [<https://www.gob.mx/siap/documentos/atlas-agroalimentario-2019>]
- Slootweg, R., Vanclay, F. and van Schooten, M. (2001). Function evaluation as a framework for the integration of social and environmental impact assessment. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 19, 19-28.
- Mondragón, R. E. (2017). Estimación de biomasa aérea y contenido de carbono en bosques y selvas del Estado de México (Tesis de maestría). Colegio de Postgraduados.
- Mooney, H. A. and Ehrlich, P. R. (1987). Ecosystem services: A fragmentary history. En G. C. Daily (Ed.), *Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems* (pp. 11-22). Island Press.
- Montes-León, M. A., Uribe-Alcántara, E. M. y García, E. (2011). Mapa nacional de erosión potencial. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(5/13).
- NASA Shuttle Radar Topography Mission. (2013). NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. doi.org
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2010). NORMA Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental—Especies nativas de México de flora y fauna silvestres—Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio—Lista de especies en riesgo. Recuperado de <http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4254/semarnat/semarnat.htm>
- Orozco Hernández, M. E. (2007). Entre la competitividad local y la competitividad global: Floricultura comercial en el Estado de México. *Convergencia. Revista de Ciencias Sociales*, 14(45), 111-160.
- Organización de las Naciones Unidas. (n.d.). Convenio sobre la Diversidad Biológica. Recuperado de <http://www.un.org/es/events/biodiversityday/convention.shtml>

- Pérez Miranda, R., Moreno Sánchez, F., González Hernández, A. y Arriola Padilla, V. J. (2014). Distribución de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. y *Pinus montezumae* Lamb. ante el cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5, 19-33.
- Regil García, H. H. y Franco Maass, S. (2009). Nivel de adecuación del territorio para el desarrollo de especies agrícolas y forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca. *Economía, Sociedad y Territorio*, 9(31), 803-830.
- Rivera Herrera, N. M. (2015). Clusterización y competitividad florícola en el Estado de México [Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario UAEM Tenancingo]. Repositorio Institucional UAEMéx.
- Rojas, G. F. y Villers R., L. (2005). Comparación de dos métodos para estimar la densidad de la madera de *Pinus hartwegii* Lindl. del Volcán La Malinche. *Madera y Bosques*, 11, 63-71.
- Sánchez Colón, S., Flores Martínez, A., Cruz-Leyva, I. A. y Velázquez, A. (2009). Estado y transformación de los ecosistemas terrestres por causas humanas. En Conabio (Ed.), *Capital natural de México*, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio (pp. 75-129). Conabio.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2024). Qué hay detrás de la floricultura: Más allá de la belleza floral. Blog, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). (2017). México sin hambre. Recuperado de http://www.sedesol.gob.mx/boletinesSinHambre/Informativo_02/infografia.html
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2024). Panorama Agroalimentario 2024. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/siap>
- Schlosberg, D. (2013). Theorising environmental justice: The expanding sphere of a discourse. *Environmental Politics*, 22(1), 37–55. <https://doi.org/10.1080/09644016.2013.755387>
- Uttam Roy and Majumder, M. (2016). Vulnerability of watersheds to climate change assessed by neural network and analytical hierarchy process. Springer.

- Villanueva, A., Avitia, J. y Ramírez, J. (2019). Impacto de la producción florícola del sur del Estado de México en los derechos humanos. IEECC, UNAM.
- Walther, G. R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T. J. C., Fromentin, J. M., Hoegh-Guldberg, O. and Bairlein, F. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416, 389-395.
- Wischmeier, W. H. and Smith, D. D. (1965). Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: Guide for selection of practices for soil and water conservation (Agric. Handbook). U.S. Department of Agriculture.
- Wischmeier, W. H. and Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning (Agric. Handbook). U.S. Department of Agriculture.
- Zúñiga, B. B. (2023). Malinalco en la época prehispánica. *Arqueología Mexicana*, 178, 38-43.

Evaluación de la vulnerabilidad futura de los acuíferos de México ante el cambio climático

Assessment of the Future Vulnerability of Mexico's Aquifers to Climate Change

Celso Rico Firo¹, José Luis Expósito Castillo^{1*}, Miguel Ángel Gómez Albores¹, María Vicenta Esteller Alberich¹ y Juan Manuel Esquivel Martínez²

¹Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) de la Universidad Autónoma del Estado de México, Carretera Toluca-Atlacomulco, km 14.5, Toluca, México, C.P. 50200. rificel@gmail.com, jlexpositoc@uaemex.mx, magomeza@uaemex.mx, mvesteller@uaemex.mx, <https://orcid.org/0009-0007-4532-4948>, <https://orcid.org/0000-0002-5026-9302>, <https://orcid.org/0000-0002-6313-9187>, <https://orcid.org/0000-0002-5832-8741>

²Secihti - Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) de la Universidad Autónoma del Estado de México, Carretera Toluca-Atlacomulco, km 14.5, Toluca, México, C.P. 50200. jmesquivel@secihti.mx, <https://orcid.org/0000-0003-1864-4501>

*Autor(a) de Correspondencia

Recibido: 18/09/2025. Aceptado: 24/11/2026. Publicado: 05/02/2026.

Cómo citar este artículo: Rico Firo, C., Expósito Castillo, J. L., Gómez Albores, M. A., Esteller Alberich, M. V. y Esquivel Martínez, J. M. (2026). Evaluación de la vulnerabilidad futura de los acuíferos de México ante el cambio climático. *Geografía Aplicada*, 2(1), 231-253.

Resumen

La vulnerabilidad climática de los acuíferos de México se encuentra estrechamente vinculada a las variaciones en los patrones de precipitación y temperatura proyectadas bajo escenarios futuros de cambio climático. Dichas modificaciones pueden alterar la recarga natural de los acuíferos, reducir su disponibilidad y acentuar los procesos de sobreexplotación en regiones donde la demanda ya supera la oferta hídrica. En este marco se planteó como objetivo evaluar la vulnerabilidad futura de los 653 acuíferos de México ante el cambio climático, lo que permitirá proponer estrategias que ayuden a prevenir, mitigar o disminuir sus impactos. La metodología permitió proyectar la vulnerabilidad de los acuíferos mediante el análisis de series mensuales de precipitación y temperatura media a las cuales se aplicó la prueba no paramétrica Mann Kendall (MK). Este procedimiento se llevó a cabo considerando dos escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5, para cuatro Modelos de Circulación General (MCG). Los resultados obtenidos muestran que el número de acuíferos vulnerables es mayor con el escenario SSP5-8.5 (137 acuíferos) en comparación con el escenario SSP2-4.5 (91 acuíferos).

Palabras clave: vulnerabilidad, cambio climático, escenarios.

Abstract

The climate vulnerability of Mexico's aquifers is closely linked to variations in precipitation and temperature patterns projected under future climate change scenarios. These changes can alter the natural recharge of aquifers, reduce their availability, and accentuate overexploitation processes in regions where demand already exceeds water supply. Within this framework, the objective aimed to assess the future vulnerability of Mexico's 653 aquifers to climate change, which will allow for the proposal of strategies to help prevent, mitigate, or reduce its impacts. The methodology made it possible to project the vulnerability of aquifers by analysing monthly precipitation and average temperature series to which the non-parametric Mann Kendall (MK) test was applied. This procedure was

carried out considering two climate change scenarios, SSP2-4.5 and SSP5-8.5, for four General Circulation Models (GCMs). The results obtained show that the number of vulnerable aquifers is higher in the SSP5-8.5 scenario (137 aquifers) compared to the SSP2-4.5 scenario (91 aquifers).

Keywords: vulnerability, climate change, scenarios.

1. Introducción

La vulnerabilidad de los acuíferos ante los efectos cambio climático constituye un tema de creciente interés en la gestión de los recursos hídricos subterráneos a nivel mundial (Cao et al., 2024). Particularmente en aquellas regiones donde los acuíferos ya enfrentan una situación crítica a causa de la sobreexplotación y a las consecuencias del cambio climático. (IPCC, 2022). No obstante, la creciente presión antropogénica y los cambios en los patrones de precipitación y temperatura, constituye una amenaza para la disponibilidad, cantidad y calidad de agua necesaria para satisfacer las necesidades de la población, amenazando los derechos al agua y al saneamiento de miles de millones de personas (Bordbar et al., 2023; UNESCO, 2022; Al-Najjar et al., 2022;). Las aguas subterráneas representan un componente fundamental del ciclo hidrológico y un recurso natural estratégico, debido a su papel clave como fuente de abastecimiento para el consumo de la población, la producción agrícola, la industria y el sostenimiento de los ecosistemas a nivel mundial (UNESCO, 2022). El cambio climático está transformando la distribución de las lluvias, lo que incrementa la presión sobre el agua subterránea, especialmente en regiones áridas y semiáridas (Williams et al., 2025).

La vulnerabilidad de los acuíferos depende de factores, hidrogeológicos (características geológicas e hidrogeológicas), ambientales (relacionados con la calidad de los cuerpos de aguas superficiales) y socioeconómicos (cambios de uso de suelo, crecimiento poblacional). En este sentido, la adaptación requiere enfoques integrales que combinen la gestión

sostenible del agua subterránea, el fortalecimiento de la gobernanza y la aplicación de escenarios de cambio climático (IPCC, 2022; UNESCO, 2022).

Los escenarios de cambio climático constituyen herramientas que permiten representar de manera simplificada las posibles condiciones climáticas futuras, basados en un conjunto de variables como la precipitación y temperatura. Los cambios en dichas variables radican fundamentalmente en la creciente acumulación de gases de efecto invernadero (GEI) que se concentran en la atmósfera (Irani et al., 2023; IPCC, 2022).

Los Modelos de Circulación General (MCG) son herramientas computacionales de alta complejidad que permiten representar y analizar el comportamiento del sistema climático, considerando distintos escenarios de concentración de gases de efecto invernadero (Iranmanesh et al., 2021). Estos modelos representan la atmósfera mediante una discretización espacial y temporal que permite resolver numéricamente los procesos físicos fundamentales incluyendo los flujos de masa, energía y cantidad de movimiento a través de sistemas de ecuaciones diferenciales. Cada MCG opera mediante una malla tridimensional en la cual se integran, en intervalos de tiempo definidos, ecuaciones de conservación que requieren capacidades de cómputo de alto rendimiento para su adecuada resolución (IPCC, 2021).

Existen diversos MCG desarrollados por distintos países, entre los más destacados se encuentran el MPI-ESM-LR (Alemania), el HADGEM2-ES (Reino Unido), el GFDL-CM3 (Estados Unidos), y el CNRM-CM5 (Francia), entre otros. Estos modelos desempeñan un papel fundamental en la simulación del clima presente y pasado, así como en la proyección de escenarios (IPCC, 2021). En México no se cuenta con un modelo propio para simular proyecciones futuras del cambio climático; no obstante, esta limitación no ha impedido el avance de investigaciones en el campo de la modelación climática. El uso integrado de diversos modelos ha hecho posible la elaboración de proyecciones para diferentes horizontes temporales, como las reportadas en el Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el Cambio Climático (Arreguín et al., 2015).

Algunos estudios en México como los de (Andrade-Velázquez et al., 2023; Andrade-Velázquez et al., 2021; Arreguín et al., 2015) donde se utilizaron los niveles forzamiento radiativo, denominados Representative Concentration Pathways, (RCP por sus siglas en inglés), propuestos en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (IPCC, 2014), indican que la precipitación proyectada para el periodo 2015-2039 podría disminuir ligeramente en todo el país, hasta un 6% bajo el escenario RCP4.5. En el escenario RCP6.0, se espera que las disminuciones más significativas se presenten en Sonora, Chihuahua y Coahuila, con reducciones de hasta un 15%. Para el periodo 2075-2099, durante la temporada primavera-verano, el escenario RCP6.0 proyecta que la disminución de precipitación sería menor en la mayor parte de México en comparación con el periodo 2015-2039; no obstante, en la Península de Baja California y en Sonora se estiman reducciones de hasta el 18%. Por su parte, el escenario RCP8.5 proyecta que la precipitación en primavera-verano podría disminuir hasta un 21% en Sonora y un 18% en la Península de Yucatán, mientras que en el resto del país los cambios se ubicarían en un intervalo aproximado de -3% a -12%.

El más reciente informe del IPCC, basado en el marco CMIP6 (IPCC, 2022), establece cinco escenarios de emisiones conocidos como trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP, por sus siglas en inglés: shared socioeconomic Pathways), en los cuales los niveles de forzamiento radioactivo (RCP) se combinan con las proyecciones de cambio social esperado, proporcionando un marco más completo para evaluar los impactos futuros del cambio climático. Estudios recientes (Khardekar et al., 2025; Patel et al., 2025; Song et al., 2022) han mostrado que los modelos del CMIP6 presentan menor incertidumbre, lo que incrementa la confiabilidad en la simulación de los patrones de precipitación y temperatura en comparación con los modelos del CMIP5.

México es un país vulnerable a los efectos del cambio climático, debido a la influencia de factores naturales como su ubicación geográfica y su compleja orografía junto con procesos de deterioro ambiental, prácticas inadecuadas en el manejo de los recursos naturales, políticas públicas insuficientes y los altos niveles de vulnerabilidad social. En conjunto, estos

factores intensifican los riesgos y debilitan la capacidad de adaptación frente a los eventos extremos asociados al cambio climático (CEFP, 2024).

Ante este escenario, el objetivo del estudio fue evaluar la vulnerabilidad futura de los 653 acuíferos de México frente a los efectos del cambio climático, con el fin de proponer estrategias orientadas a la prevención, mitigación y disminución de sus impactos por el cambio climático. Para ello, se analizaron los escenarios climáticos SSP2-4.5 y SSP5-8.5 derivado de cuatro MCG del CMIP6, y se aplicó la prueba no paramétrica Mann-Kendall (MK) dentro de un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los resultados obtenidos constituyen información útil para los tomadores de decisiones, facilitando la planificación e implementación de estrategias orientadas a la gestión sostenible de los acuíferos que presentan niveles altos y muy altos de vulnerabilidad.

2. Metodología

2.1. Zona de estudio

México se encuentra entre los paralelos 32° 43' 06" y 14° 32' 27' de latitud norte y sur respectivamente y los meridianos 86° 42' 36" y 118° 22' 00" de longitud Oeste. Su superficie total es de 1964 millones de kilómetros cuadrados, de los cuales 1959 millones corresponden a la zona continental, y el resto a las zonas insulares (CONAGUA 2023b). Debido a su ubicación geográfica, el territorio mexicano presenta una gran diversidad de climas. La zona centro y noroeste del país, clasificadas como zona árida y semiárida, abarcan aproximadamente dos terceras partes del territorio y registra precipitaciones anuales inferiores a 500 milímetros. En contraste, el sureste del país presenta un clima húmedo con precipitaciones que superan los 2000 milímetros anuales (CONAGUA 2023a).

La relevancia del agua subterránea en México se refleja en el volumen que consumen los principales usuarios. Al año 2020, el 39.4% del volumen total concesionado para usos consuntivos equivalente a 35 315 hm³ proviene de fuentes subterráneas. Para fines de gestión y administración, el territorio nacional está dividido en 653 acuíferos (Figura 1), cuya

denominación oficial fue establecida y publicada en el Diario Oficial de la Federación el 5 de diciembre de 2001 (CONAGUA 2023b).

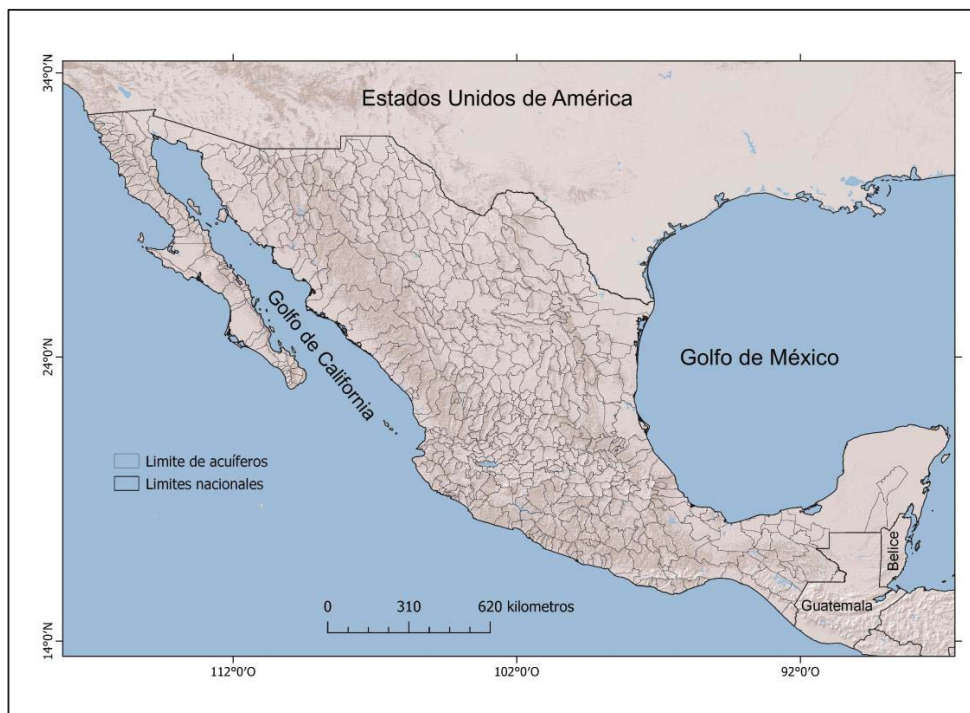


Figura 1. Zona de estudio y límite de los acuíferos.

Fuente: elaboración propia con base en los límites de los acuíferos proporcionados por el SINA, año 2020.

2.2. Materiales

La presente investigación, se enmarca en la integración del análisis de cuatro Modelos de Circulación General (MCG), considerando dos escenarios del cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5. El primero caracterizado como un escenario “optimista” dado que representa una estrategia de mitigación moderada frente a los niveles de GEI, por su parte el segundo representa un escenario “pesimista”, al considerar que las políticas públicas, en general no serían efectivas para mitigar las emisiones antropogénicas de los GEI. Los datos utilizados para las variables de precipitación y temperatura están integrados por imágenes mensuales

en formato ráster con una resolución de 30" arcos de segundo(1km) aproximadamente. La temporalidad de las variables se estructuró formando series de tiempo para el periodo de tiempo (1910-2080) de dos escenarios climáticos SSP2-4.5 y SSP5-8.5 de cada MCG. Estas series fueron analizadas mediante la prueba no paramétrica Mann Kendall (Mk), que permitió evaluar las tendencias de la precipitación y temperatura media, este proceso se efectuó mediante módulos automatizados dentro del software Idrissi TerrSet (Eastman, 2024).

2.3. Proceso metodológico

El proceso metodológico se desarrolló en tres etapas principales conforme al esquema de la figura 2.

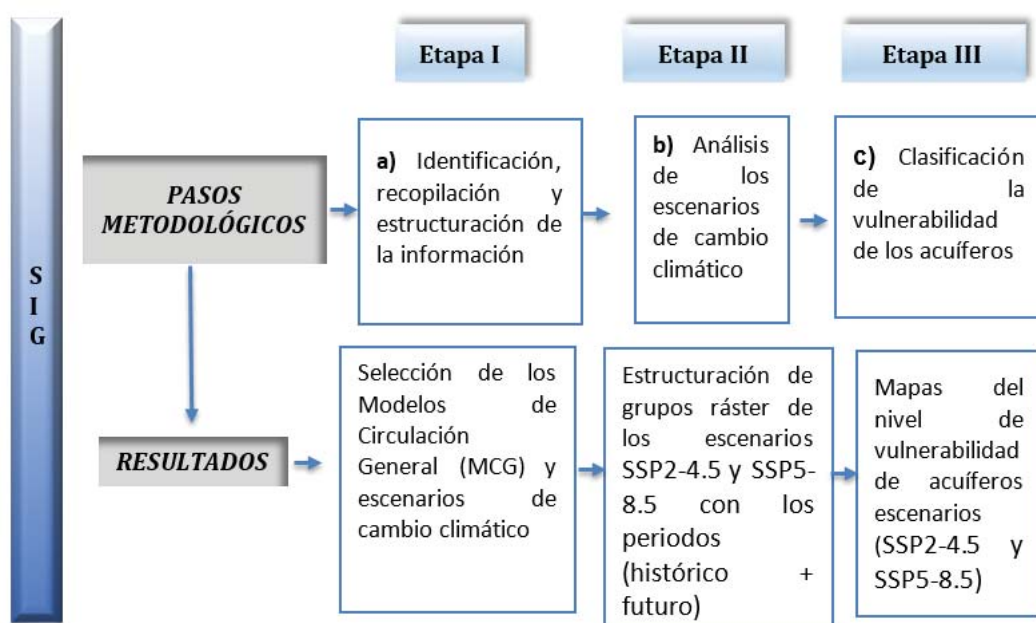


Figura 2. Esquema para el proceso metodológico.

Fuente: elaboración propia.

a) Identificación, recopilación y estructuración de la información: Se exploraron la base de datos de diferentes plataformas disponibles:

1. <https://worldclim.org/data/index.html>,
2. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>,
3. <http://www.ccafs-climate.org/>,
4. <http://chelsa-climate.org/>,

Estas plataformas registran datos del comportamiento para las variables climáticas de los periodos históricos como de periodos futuros que son la base para estructurar series de tiempo.

Posteriormente, se elaboró un inventario de los MCG utilizados en la base de datos del proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados correspondientes al Sexto informe CMIP6 del Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático (IPCC). Para el fin del presente estudio, se consideraron datos disponibles de precipitación y temperatura media de cuatro MCG (Tabla 1), para dos escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Se considero que los modelos seleccionados ya fueron previamente aplicados en México en el proyecto nacional más reciente sobre escenarios de cambio climático, titulado Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica (Cavazos et al., 2014). Adicionalmente, estos modelos han sido utilizados y evaluados en otros estudios (Manzanilla-Quiñones et al., 2021; CEPAL, 2020), los cuales evidencian que son representativos de las condiciones climáticas del país, por lo que resultan adecuados para el análisis desarrollado en este estudio.

El siguiente paso consistió en la descarga de las imágenes de los datos mensuales de precipitación y temperatura media para los periodos históricos de los años 1940 (1910-1949), 1970 (1950-1979), y 2000 (1980-2009). Estos datos se obtuvieron de la plataforma

de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> (Cuervo-Robayo, 2020), que ofrece la posibilidad de consultar, visualizar, y descargar cartografía temática en distintas escalas. En ella se encuentran datos climáticos de todo el país con una resolución espacial cercana a 1 km² (30 segundos de arco), disponibles en el sistema de coordenadas WGS 84.

Tabla 1. Modelos de Circulación General (MCG) seleccionados.

Modelos	Institución	Frecuencia (datos)	País
CNRM_CM6_1_HR	Centre National the Recherches Meteorologiques (CNRM-CERFACS)	Mensual	Francia
GISS_E2_1_G	NASA Goddard Institute for Space Studies (NASA-GISS)	Mensual	Estados Unidos
MPI_ESM1_2_HR	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	Mensual	Alemania
MRI_ESM2_0	Meteorological Research Institute (MRI)	Mensual	Japón

Fuente: elaboración propia.

Los datos para los periodos futuros 2030 (2021-2040), 2050 (2041-2060) y 2070 (2061-2080), correspondientes a los escenarios climáticos SSP2- 4.5 y SSP5-8.5 se consiguieron de <https://worldclim.org/data/index.html> (WORLD CLIM, 2024), portal de acceso abierto que permite acceder al conjunto de datos climáticos futuros a nivel mundial de alta resolución (1 km² con sistema de referencia WGS 84), información clave para evaluar los impactos del cambio climático en los recursos hídricos.

b) **Análisis de los escenarios de cambio climático:** En el primer paso de esta etapa, se estructuraron los grupos ráster correspondiente a los escenarios climáticos SSP2-4.5 y SSP5-8.5, considerando tanto los datos históricos como futuros. Este procedimiento se aplicó para los cuatro Modelos de Circulación General (MCG) seleccionados y para las dos variables climáticas analizadas precipitación y temperatura media. Posteriormente una vez clasificadas las imágenes en grupos ráster, de acuerdo con la estructura presentada en la tabla 2, se calcularon el acumulado anual de la precipitación y el promedio anual de

temperatura. Como resultado obtuvieron imágenes que contienen la información climática correspondiente a cada periodo individual para cada MCG.

El segundo paso consistió en generar nuevas series de tiempo a partir de las imágenes correspondientes a los datos acumulados de precipitación y a los promedios de temperatura para cada escenario climático (SSP2-4.5 y SSP5-8.5) incorporando además los periodos históricos conforme a la estructura mostrada en la tabla 3. Cada serie se construyó con tres imágenes del periodo histórico y tres imágenes de los periodos futuros de cada SSP, respectivamente. A estas series se les aplicó la prueba no paramétrica Mann Kendall, ampliamente utilizada para identificar tendencias de los datos a lo largo plazo (MK) (Mann, 1945; Kendall, 1975; Gilbert, 1987).

Tabla 2. Estructura de los valores de cada variable para cada MCG.

MCG	Histórico			SSP2-4.5			SSP5-8.5		
	1940	1970	2000	2030	2050	2070	2030	2050	2070
Cnrm_cm6_1_hr	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Giss_e2_1_g	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Mpi_esm1_2hr	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Mri_esm2_0	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Estructura de las series de tiempo para cada MCG

MCG	Acumulado Precipitación	Promedios temperatura media
Cnrm_cm6_1_hr	Histórico+SSP2-4.5 Histórico+SSP5-8.5	Histórico+SSP2-4.5 Histórico+SSP5-8.5
Giss_e2_1_g	Histórico+SSP2-4.5 Histórico+SSP5-8.5	Histórico+SSP2-4.5 Histórico+SSP5-8.5
Mpi_esm1_2hr	Histórico+SSP2-4.5 Histórico+SSP5-8.5	Histórico+SSP2-4.5 Histórico+SSP5-8.5
Mri_esm2_0	Histórico+SSP2-4.5 Histórico+SSP5-8.5	Histórico+SSP2-4.5 Histórico+SSP5-8.5

Fuente: elaboración propia

Esta prueba facilita el análisis de las tendencias en series temporales climatológicas, ya que, a diferencia de las pruebas paramétricas, resulta menos sensible a la presencia de valores atípicos. Esto se debe a que se fundamenta en los rangos de los datos y no en su distribución, lo que le otorga mayor robustez estadística. Su objetivo es determinar si existe una tendencia monótona significativa ya sea creciente o decreciente de la variable en el

tiempo. El estadístico de la prueba varía entre -1 y 1 : un valor positivo indica una tendencia creciente, mientras que un valor negativo señala una tendencia decreciente (Abeyasinghe et al., 2025). Los pasos específicos de la prueba son:

1. Se enlistan los valores de las distintas variables (por ejemplo: precipitación), de forma ordenada temporalmente ($X_1, X_2, \dots, X_n$)
2. Se determina si la diferencia entre cada par de valores es positiva o negativa al comparar su magnitud ($X_j - X_k$) con ($j > k$) de acuerdo con:

$$\text{signo}(X_j - X_k) = \begin{cases} 1 & \text{si } (X_j - X_k) > 0 \\ 0 & \text{si } (X_j - X_k) = 0 \\ -1 & \text{si } (X_j - X_k) < 0 \end{cases}$$

3. Se calcula el estadístico S , mediante la ecuación 2.1.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{signo}(X_j - X_k) \quad (2.1)$$

4. En caso de que los valores se repitan se desarrolla la ecuación 2.2.

$$\text{VAR}(S) = \frac{1}{8} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5)] \quad (2.2)$$

Donde:

n = Total de valores

t_p = Número de valores iguales

g = Grupos de empates $k-1$

Cuando el valor de S es positivo, significa que la tendencia va en aumento; si S es negativo, la tendencia disminuye. Por último, se calcula el tau (T) usando la ecuación 2.3, que es una medida de correlación entre dos variables, lo que permite determinar si la relación es creciente o decreciente, dentro de un rango que va de 1 a -1 .

$$T = \frac{2S}{n(n-1)} \quad (2.3)$$

Esta prueba permitió evaluar píxel por píxel el comportamiento de la variable, permitiendo identificar la tendencia positiva o negativa de los datos para las series temporales de cada variable. Dicho proceso se realizó utilizando la herramienta Earth Trends Modeler (ETM), conjunto de herramientas de Idrisi TerrSet (Eastman, 2024), que permite evaluar las tendencias climáticas a largo plazo, examinar los comportamientos estacionales y descomponer series temporales de imágenes con el fin de identificar patrones recurrentes en el espacio y el tiempo.

El tercer y último paso de la etapa metodológica consistió en el análisis del conjunto de imágenes ráster generadas en el paso anterior, con el propósito de identificar las regiones que presentan decrementos en la precipitación y aumentos en la temperatura media de acuerdo con cada modelo y escenario utilizado. Una vez identificadas las áreas de influencia de cada variable, se procedió a realizar el ensamble de las imágenes obtenidas a partir de los cuatro MCG, considerando simultáneamente ambas variables. Este proceso permitió generar imágenes integradas que identifican las regiones con diferentes niveles de influencia de las variables analizadas, correspondientes a los escenarios seleccionados.

c) Clasificación de la vulnerabilidad de los acuíferos: Considerando que las áreas de influencia de las variables no tenían los límites definidos, se procedió a realizar la extracción de los datos a nivel de acuífero utilizando la herramienta EXTRACT del software Idrisi TerrSet (Eastman, 2024), para este proceso se utilizó la capa vectorial de los límites por acuífero disponible en la plataforma <http://sina.conagua.gob.mx> (SINA, 2024). Posteriormente, con el propósito de representar la vulnerabilidad de los acuíferos, los resultados fueron clasificados en cinco niveles jerárquicos: muy alto, alto, medio, bajo y muy bajo, con base en los valores obtenidos a partir de la escala de Mann-Kendall.

3. Resultados

Los resultados de evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos ante el cambio climático se presentan en la tabla 4. Esta clasificación se fundamenta en las proyecciones de la reducción

de la precipitación y el incremento de la temperatura, estas condiciones se traducen en una menor recarga de los acuíferos y, por ende, en una mayor susceptibilidad a los impactos asociados al cambio climático.

Tabla 4. Nivel de vulnerabilidad de los acuíferos al cambio climático con base en los valores de la escala Mann Kendall.

Nivel de vulnerabilidad	Valores Mann Kendall	No. de acuíferos con Escenario SSP2-4.5	No. de acuíferos con Escenario SSP5-8.5
Muy alto	0.81 - 1	91	137
Alto	0.61 – 0.81	113	117
Medio	0.41 – 0.61	125	142
Bajo	0.21 – 0.41	113	130
Muy bajo	0 – 0.21	211	127

Fuente: elaboración propia

La clasificación de vulnerabilidad de los acuíferos evidencia diferencias significativas de manera espacial de acuerdo con el grado de afectación asociado al fenómeno del cambio climático (Figura 3 y 4), donde se observa que los acuíferos de la región norte del país serán más vulnerables en comparación con los del centro y sur del país, de acuerdo con las variaciones proyectadas en los patrones de precipitación y temperatura.

Así mismo el análisis comparativo entre los dos escenarios utilizados manifiestan que la magnitud de la vulnerabilidad se incrementa conforme a la severidad de las proyecciones. Bajo el escenario SSP5-8.5 (Figura 4), caracterizado por ser el escenario pesimista de altos niveles de GEI donde los efectos adversos sobre los acuíferos son mayores en relación con lo observado en el escenario SSP2-4.5 (Figura 3), escenario optimista con un nivel intermedio de GEI. De tal manera que el número de acuíferos clasificados con el nivel de muy alta vulnerabilidad muestra un crecimiento sustancial pasando de un 14% (equivalente a 91 acuíferos) con el escenario SSP2-4.5 a un 21% (equivalente a 137 acuíferos) con el escenario SSP5-8.5. Este resultado evidencia que, a medida que se intensifican las condiciones climáticas extremas, también se incrementa la cantidad de acuíferos en riesgo, lo que implica mayores desafíos para la gestión sostenible del recurso hídrico en el país.

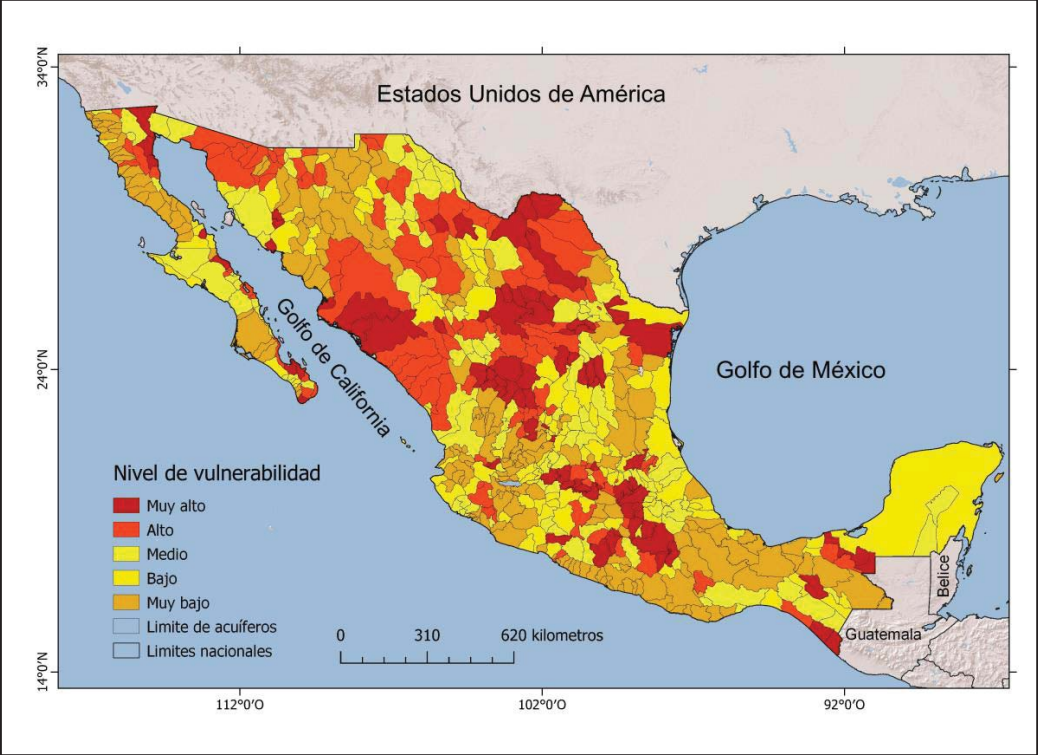


Figura 3. Nivel de vulnerabilidad de los acuíferos bajo el escenario SSP2-4.5.

Fuente: elaboración propia con base en CONABIO, WORLD CLIM, y SINA.

Los estados que concentran a los acuíferos con el nivel de vulnerabilidad muy alto correspondiente con los dos escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, se presentan en la tabla 5. Mientras que, en la tabla 6, se registran a los acuíferos clasificados con un nivel muy alto de vulnerabilidad solo con el escenario SSP5-8.5.

Tabla 5. Acuíferos de México con nivel de vulnerabilidad muy alto en ambos escenarios (*acuífero sobreexplotado, ¹ acuífero con intrusión marina, ² acuífero afectado por procesos de salinización de suelos).

Estado	Clave de Acuífero	Estado	Clave de Acuífero
Chihuahua	841, 847*.	Coahuila	502 ² , 503, 506* ² , 507, 509* ² , 510*, 511*, 515, 523* ² , 524* ² , 525, 526, 527.
Sonora	2621*, 2622, 2636* ¹ .	Zacatecas	3201, 3202, 3213, 3214*, 3215, 3216, 3217, 3219, 3220 ² , 3223* ² , 3225*, 3226.

Nuevo León	1905, 1907*, 1913, 1917*, 1922, 1923.	Baja California Sur	316, 317*, 323* ² , 324*, 325*, 328.
Durango	1004*, 1011, 1026* ² .	San Luis Potosí	2407.
Sinaloa	2502, 2503, 2504, 2514.	Guanajuato	1117, 1118*, 1119, 1120*, 1121, 1122*.
Jalisco	1412, 1435, 1436*.	México	1506*, 1507*, 1508*.
Querétaro	2202*, 2209.	Hidalgo	1302, 1310, 1311, 1313, 1316.
Baja California	210* ² , 222, 237, 243.	Aguas Calientes	101*.
Chiapas	703, 709, 710.	Guerrero	1204, 1205, 1207, 1211.
Morelos	1702.	Michoacán	1601.
Ciudad de México	901*.	Oaxaca	2014, 2023.
Puebla	2103, 2106.	Tamaulipas	2802.
Tabasco	2707, 2708.	-	-

Fuente: elaboración propia.

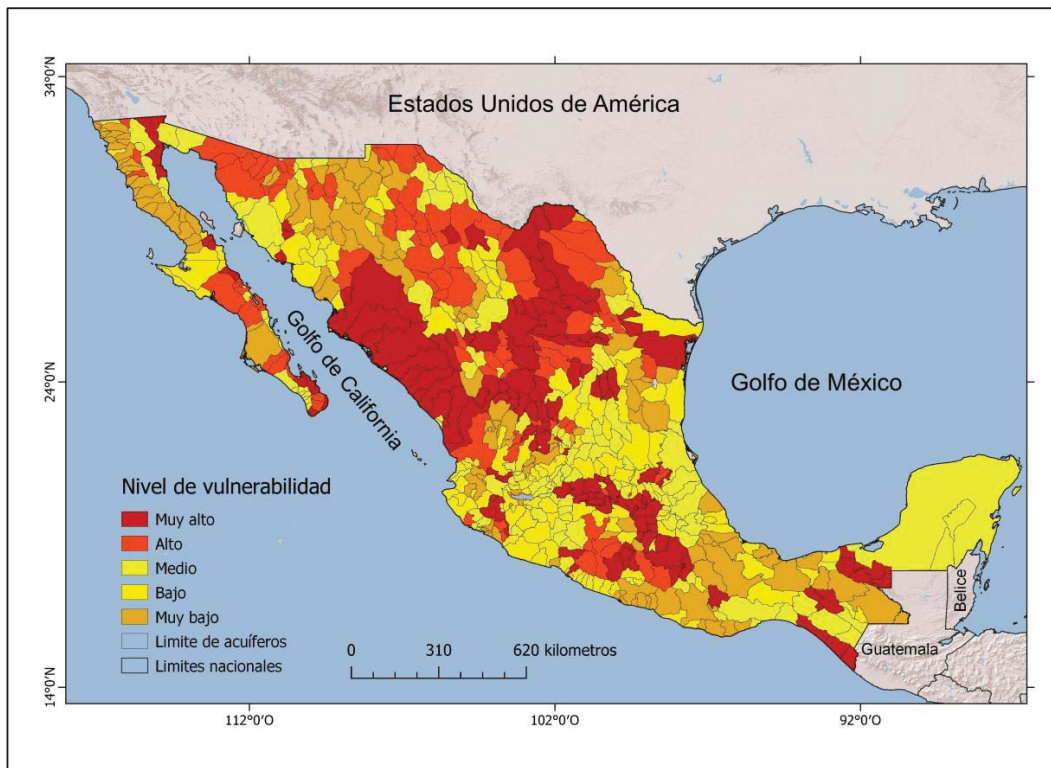


Figura 4. Nivel de vulnerabilidad de los acuíferos bajo el escenario SSP5-8.5.

Fuente: elaboración propia con base en CONABIO, WORLD CLIM, y SINA.

Tabla 6. Acuíferos de México con nivel de vulnerabilidad muy alto bajo el escenario el escenario SSP5-8.5 (*acuífero sobreexplotado, ¹ acuífero con intrusión marina, ² acuífero afectado por procesos de salinización de suelos).

Estado	Clave de Acuífero	Estado	Clave de Acuífero
Sonora	2643.	Coahuila	504, 505, 519, 528.
Durango	1006, 1012, 1017, 1024, 1025.	Zacatecas	3211, 3212
Sinaloa	2501, 2505, 2506, 2507, 2508, 2509, 2510, 2513.	Baja California Sur	318, 321.
Jalisco	1417, 1419, 1437.	San Luis Potosí	2402.
Querétaro	2203, 2204.	Guanajuato	1107, 1115, 1116.
Baja California	242.	México	1503.
Chiapas	701, 704, 711.	Hidalgo	1306.
Morelos	1701.	Aguas Calientes	105.
Nayarit	1801, 1802.	Colima	615.
Tabasco	2706.	Guerrero	1203, 1215.
Oaxaca	2025.	-	-

Fuente: elaboración propia.

4. Discusión

Los resultados obtenidos evidencian que la vulnerabilidad de los acuíferos ante el cambio climático presenta una marcada variabilidad regional, lo cual refleja la influencia directa de las condiciones climáticas y fisiográficas propias de cada zona del país. Según los escenarios analizados, el norte de México es más vulnerable, debido principalmente a la reducción esperada de las lluvias y al aumento de las temperaturas. Estas condiciones favorecen una reducción en los procesos de recarga natural, lo que podría intensificar el estrés hídrico sobre los acuíferos en dichas regiones. En contraste, los acuíferos localizados en las regiones centro y sur del país muestran una vulnerabilidad relativamente menor, probablemente vinculada a una mayor disponibilidad de precipitación y, en algunos casos, a condiciones geomorfológicas más favorables para la infiltración. Este patrón espacial concuerda con lo reportado en el Informe Nacional sobre la Vulnerabilidad Hídrica ante el Cambio Climático (Arreguín et al., 2015), lo que respalda la consistencia de los resultados obtenidos y refuerza la necesidad de implementar estrategias de gestión diferenciadas que consideren las particularidades climáticas y ambientales de cada región.

Asimismo, el hecho de que más del 50 % de los acuíferos evaluados presenten niveles muy altos de vulnerabilidad y que, de manera coincidente, hayan sido clasificados como sobreexplotados en el más reciente informe de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2023a) subraya la gravedad del escenario actual. Esta convergencia entre vulnerabilidad climática y sobreexplotación intensifica los riesgos asociados al deterioro cuantitativo y cualitativo del recurso, comprometiendo tanto la seguridad hídrica regional como la resiliencia de los sistemas socioambientales dependientes del agua subterránea. En este contexto, los resultados sugieren que, sin la adopción de medidas integrales de gestión que consideren los impactos climáticos presentes y futuros, la problemática tenderá a intensificarse rápidamente y mantenerse a lo largo del tiempo.

5. Conclusiones

El análisis de vulnerabilidad de los acuíferos mediante escenarios de cambio climático asociados a altos niveles de emisiones de GEI, como el SSP5-8.5, permite reconocer que el agua subterránea enfrenta presiones crecientes, principalmente por la disminución de la recarga natural y el aumento sostenido de las extracciones. Los resultados evidencian que las variaciones proyectadas en los patrones de precipitación y temperatura podrían intensificar la condición de sobreexplotación en un mayor número de acuíferos, especialmente en regiones áridas y semiáridas. En conjunto, estos hallazgos subrayan la necesidad de fortalecer las estrategias de gestión y conservación del recurso hídrico ante un contexto climático cada vez más incierto.

Se identificó que los acuíferos del norte presentan una mayor sensibilidad ante al cambio climático en ambos escenarios, mientras que los del centro y sur muestran un grado de afectación relativamente menor. Esta heterogeneidad en la respuesta regional evidencia la necesidad de desarrollar estudios específicos y más detallados por región, a fin de complementar los resultados obtenidos.

En síntesis, la gestión sostenible del recurso hídrico requiere un enfoque integral que combine acciones de conservación, regulación y control orientadas a prevenir, mitigar o reducir los impactos del cambio climático. Por lo que resulta fundamental conservar y restaurar las zonas de recarga mediante prácticas adecuadas de manejo de suelos, reforestación y protección de áreas estratégicas para favorecer la infiltración. Del mismo modo, es indispensable regular la extracción ajustando los volúmenes concesionados a la disponibilidad real del acuífero, mejorar la eficiencia en los usos del agua y fortalecer los sistemas de monitoreo piezométrico para una supervisión continua del comportamiento del recurso. Asimismo, la incorporación de soluciones basadas en la naturaleza para incrementar la infiltración y reducir la erosión. Finalmente, debe establecerse un marco estricto de restricciones para actividades de alto impacto incluida la minería dentro de las zonas de recarga, que garanticen la preservación en cantidad y calidad del agua a largo plazo.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen a la SECIHTI por el respaldo otorgado a través de una beca doctoral, que permitió la culminación de este trabajo.

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, donde se aplicaron las mejores prácticas éticas.

8. Referencias

Abeyasinghe, U., Balkissoon S. and Aloysius, N. (2025). Assessment of hydroclimatic variability and aridity trends in the Mississippi River Basin using parametric and non-parametric techniques. *Front. Clim.* 7:1481926. [https://doi:10.3389/fclim.2025.1481926](https://doi.org/10.3389/fclim.2025.1481926)

- Al-Najjar, H., Ceribasi, G., Dogan, E., Ceyhunlu, A. I., Abualtayef, M. and Qahman, K. (2022). GCMs simulation-based assessment for the response of the Mediterranean Gaza coastal aquifer to climate-induced changes. *Journal of Water and Climate Change*, 13(6), 2278-2297. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.339>
- Andrade-Velázquez, M. y Montero-Martínez, M.J. (2023). Tendencias históricas y proyectadas de la temperatura superficial media en Sur-Sureste de México utilizando ERA5 y CMIP6. *Clima2023*, 11, 111. <https://doi.org/10.3390/cli11050111>
- Andrade-Velázquez, M. y Medrano-Pérez, O. R. (2021). Patrones de precipitación históricos en la región Sur-Sureste de México y proyecciones futuras. *Earth Sciences Research Journal*, 25(1), 69–84. <https://doi.org/10.15446/esrj.v25n1.87255>
- Arreguín Cortés, F. I., López Pérez, M., Rodríguez López, O. y Montero Martínez, M.J. (2015). Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, ©2015. 148 p.; 28 x 43 cm
- Bordbar, M., Rezaie, F., Bateni, S. M., Jun, C., Kim, D., Busico, G., Moghaddam, H. K., Paryani, S., Panahi, M., and Valipour, M. (2023). Global review of modification, optimization, and improvement models for aquifer vulnerability assessment in the era of climate change. *Current Climate Change Reports*, 9(4), 45-67. <https://doi.org/10.1007/s40641-023-00192-2>
- CCAFS Climate (2020). <http://www.ccafs-climate.org/>
- Cavazos T. y De Grau P. (2014). Estudio para la incorporación de nuevas variables en los escenarios de cambio climático para México utilizados en la Quinta Comunicación Nacional. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C. Departamento de Oceanografía Física, CICESE.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe)/CAC-SICA (Consejo Agropecuario Centroamericano del Sistema de la Integración Centroamericana)

(2020). Análisis espacial de datos históricos y escenarios de cambio climático en México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana (LC/MEX/TS.2020/43), Ciudad de México.

Centro de Estudios de las Finanzas Públicas (CEFP) (2024). Las Políticas Públicas Federales para el cambio climático en México. Cámara de Diputados.

CHELSEA Datos climáticos gratuitos en alta resolución (2020). <http://chelsea-climate.org/>

Clima mundial WorldClim (2024). <https://www.worldclim.org>

Cao, C., and Ying, M. (2024). Assessing Water Resource Vulnerability in an Agricultural Basin for Climate Change Adaptation. *Water Resources Management*, 39(1). <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03966-x>

CONAGUA (2023a). Estadísticas del agua en México. www.gob.mx/conagua. Pp. 312.

CONAGUA (2023b). Atlas del agua en México. www.gob.mx/conagua. Pp. 158

Cuervo-Robayo AP, Ureta C, Gómez-Albores MA, Meneses-Mosquera AK, Teñilez-Valde's O, Martínez-Meyer E. (2020). One hundred years of climate change in Mexico. *PLoS ONE* 15(7): e0209808. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209808>

Eastman. (2024). IDRISI TerrSet. Geoespacial Monitoring and Modeling System. Massachusetts, United States: Clark Labs at Clark University.

Gilbert, R. O. (1987). Statistical methods for environmental pollution monitoring. New York: John Wiley and Sons.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team: R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)]. IPCC.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, et al., Eds.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Cooley, P. M. Zhai, et al., Eds. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

Irani, M., Salimi, M., Talouki, F. G., and Roohi, M. (2024). Assessing the impacts of climate change on the vulnerability of coastal aquifers to the seawater intrusion. Discover Civil Engineering, 1, Article 109. <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00117-4>

Iranmanesh, R., Jalalkamali, N. y Tayari, O. (2021). Disponibilidad de recursos hídricos en diferentes escenarios de cambio climático en el sureste de Irán. 12 (8), 3976–3991. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.373>

Kendall, M. G. (1975). Rank correlation methods (4th ed.). London: Charles Griffin

Khardekar, P.; Chaudhari, HS; Kumar, V.; Bhawar (2025). Proyección de la estructura vertical de las nubes y los efectos radiativos a lo largo de la región del sur de Asia en los modelos CMIP6. Atmósfera 2025,16, 746. <https://doi.org/>

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. Econometrica, 13(3), 245–259. <https://doi.org/10.2307/1907187>

Manzanilla-Quiñones U, Pozo-Montuy G, Delgado-Valerio P, Martínez-Sifuentes AR, Aguirre-Calderón O.A. (2021). Escenarios climáticos (CMIP-5) para la Reserva de la

Biosfera Pantanos de Centla, Tabasco, México. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios Núm. Esp. l:e2588. DOI: 10.19136/era.a8nl.2588

Navarro-Racines, C., Tarapues, J., Thornton, P. et al. (2020). Proyecciones CMIP5 de alta resolución y corregidas por sesgo para evaluaciones de impacto del cambio climático. Datos científicos 7, 7 (2020) <https://doi:10.1038/s41597-019-0343-8>

Patel, G., Das, S. y Das, R. (2025). Un enfoque comparativo para comprender el rendimiento de los modelos CMIP6 para la temperatura máxima cerca del trópico de cáncer utilizando múltiples conjuntos de aprendizaje automático. Gestión de recursos hídricos 39, 3921–3936 (2025). <https://doi.org/10.1007/s11269-025-04137-2>

Sistema Nacional de Información del Agua (2024). <https://sina.conagua.gob.mx>

Song Y.H, Chung E.S, Shahid S. (2022). Diferencias en extremos e incertidumbres en simulaciones de escorrentía futura. Uso de SWAT y LSTM para escenarios de SSP. Sci Total Environ 838:156162

UNESCO (2022). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022: AGUAS SUBTERRÁNEAS. Hacer visible el recurso invisible. Resumen ejecutivo.

Williams, S.A.; Megdal, S.B.; Zuniga-Teran, A.A.; Quanrud, D.M.; Christopherson, G. (2025). Mapping Groundwater Vulnerability in Arid Regions: A Comparative Risk Assessment Using Modified DRASTIC Models, Land Use, and Climate Change Factors. Land 2025, 14, 58. <https://doi.org/10.3390/land14010058>