




Dinámica de las Coberturas y Usos del Suelo en la Cuenca Laguna de Zapotlán Dynamics of Land Cover and Land Use in the Laguna de Zapotlán Basin

Ma. del Rosario Beltrán-Aldaco¹ , Luis Manuel Martínez-Rivera^{1*} ,
Fermín Pascual-Ramírez² , Oscar Gilberto Cárdenas-Hernández¹  y
Christian R. Escudero³ 

¹ Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Costa Sur, Departamento de Ecología y Recursos Naturales. Avenida Independencia Nacional No. 151, Centro. 48900 Autlán de Navarro, Jalisco, México; (M.R.B.A.), (L.M.M.R.), (O.G.C.H.).

* Autor para correspondencia: lmartinez@cucsur.udg.mx

² Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad. Antigua Carretera a Pátzcuaro No.8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta. 58190 Morelia, Michoacán, México; (F.P.R.).

³ Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Costa. Av. Universidad No. 203. Delegación Ixtapa. 48280 Puerto Vallarta, Jalisco, México; (C.R.E.A.).

RESUMEN

Los ecosistemas naturales están experimentando transformaciones aceleradas que afectan la biodiversidad y los recursos hídricos; por ello, el monitoreo de las coberturas y usos del suelo (CUS) resulta crucial para la gestión territorial sostenible. Este estudio caracteriza la dinámica espaciotemporal de las CUS en la Cuenca Laguna de Zapotlán (CLZ), Jalisco (México), de 1976 a 2023. Se emplearon las Cartas de Vegetación y Uso del Suelo del INEGI (Series I-VII), homologadas a ocho clases, y una imagen Sentinel-2 (2023) para estimar ganancias, pérdidas, transiciones y tasa de cambio anual (TCA). El uso actual (2023) se cartografió por fotointerpretación y se validó en QGIS-AcATaMa con 50 puntos por clase (precisión global 91.7%, Kappa = 0.91). Entre 1976-2021, 63.7% de la CLZ permaneció sin cambios y 36.2% presentó transiciones. La conversión de agricultura de temporal a riego fue el proceso dominante: la agricultura de riego ganó 9721 ha (+105.9% respecto a su extensión inicial). El bosque disminuyó 4.4% y el pastizal inducido 78.6%, mientras los asentamientos humanos crecieron +214.2%. En 2023, el uso agrícola ocupó 21 908 ha (47.8%), de las cuales 3668 ha (8%) correspondieron a agricultura protegida, evidenciando la intensificación agroindustrial impulsada por mercados de alto valor y políticas locales. Estas transformaciones alteran la infiltración, la escorrentía y la recarga, con implicaciones críticas en una cuenca endorreica y potencial presión sobre el recurso hídrico subterráneo. Los resultados subrayan la necesidad de monitoreo continuo, regulación y políticas integrales que equilibren el desarrollo agrícola con la conservación –en particular del humedal Ramsar Laguna de Zapotlán. El estudio aporta una línea base actualizada y, pese a la limitación de escala de las series oficiales, brinda evidencia robusta para orientar la planificación y la gestión ambiental en la CLZ.

Palabras clave: análisis geoespacial, cuencas hidrográficas, transformación agrícola, transiciones del paisaje, urbanización.

SUMMARY

Natural ecosystems are undergoing accelerated transformations that are profoundly affecting biodiversity and water resources; therefore, monitoring land cover and use (LCU) is crucial for sustainable territorial management. This study characterizes the spatiotemporal dynamics of LCU in the Laguna de Zapotlán Basin (CLZ), Jalisco, Mexico, from 1976 to 2023. INEGI Vegetation and Land Use Maps (Series I-VII), standardized into eight classes, and a Sentinel-2 image (2023) were used to estimate gains, losses, transitions, and the annual rate of change (ACR).



Cita recomendada:

Beltrán-Aldaco, M. R., Martínez-Rivera, L. M., Pascual-Ramírez, F., Cárdenas-Hernández, O. G., & Escudero, C. R. (2026). Dinámica de las Coberturas y Usos del Suelo en la Cuenca Laguna de Zapotlán. *Terra Latinoamericana*, 44, 1-16. e2381. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v44i.2381>

Recibido: 27 de julio de 2025.
Aceptado: 19 de enero de 2026.
Artículo. Volumen 44.
Mayo de 2026.

Editor de Sección:
Dr. Fidel Núñez-Ramírez

Editor Técnico:
Dr. Marco Antonio Camacho Escobar



Copyright: © 2026 by the authors.
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Current land use (2023) was mapped by photointerpretation and validated in QGIS-AcATaMa with 50 points per class (overall accuracy = 91.7%, Kappa = 0.91). Between 1976 and 2021, 63.7% of the CLZ remained unchanged, whereas 36.2% underwent transitions. The conversion from rainfed to irrigated agriculture was the dominant process, with irrigated agriculture gaining 9721 ha (+105.9% relative to its initial area). Forest land decreased by 4.4% and induced grassland by 78.6%, while human settlements increased by 214.2%. In 2023, agricultural land occupied 21 908 ha (47.8%), of which 3668 ha (8%) corresponded to protected agriculture, reflecting agroindustrial intensification driven by high-value markets and local policies. These transformations alter infiltration, runoff, and groundwater recharge, with critical implications for an endorheic basin and potential pressure on groundwater resources. The results underscore the need for continuous monitoring, regulation, and integrated policies that balance agricultural development with conservation, particularly of the Laguna de Zapotlán Ramsar wetland. The study provides an updated baseline and, despite the limited scale of official series, offers robust evidence to guide environmental planning and management in the CLZ.

Index words: *geospatial analysis, watersheds, agricultural transformation, landscape transitions, urbanization.*

INTRODUCCIÓN

El cambio climático y las actividades humanas inducen modificaciones a la configuración original del paisaje, por lo que es importante desarrollar estrategias de monitoreo y evaluación de sus efectos a largo plazo (Chigbu, 2025; Hannam, *et al.*, 2025). La reconfiguración de la cobertura natural terrestre genera distintos usos del suelo, lo que da lugar al uso agrícola, pecuario, habitacional e industrial, entre otros (Romero, Ávila, Cortés y Diakite, 2022). En México, para el año 2014, las Coberturas y Usos del Suelo (CUS) con usos antropogénicos representaban 28.6% del territorio, de los cuales la agricultura ocupó 16.9% y los pastizales inducidos 9.8% (SEMARNAT, 2018).

Las transformaciones en las CUS generan efectos sobre la biodiversidad, balance hidrológico y calidad del aire (Foley *et al.*, 2005). La reducción de la superficie forestal incrementa la escorrentía y disminuye la recarga de los acuíferos (Hosseini y Ashraf, 2015; Ruiz-García, Asensio, Ramírez y Monterroso, 2023 y Ware, Chang, Lee, Chung, 2024), su conversión a pastizales y áreas agrícolas favorece la erosión, aumenta la sedimentación en cuerpos de agua y eleva el riesgo de inundaciones (Aren-Rangel, Hernández y Bonasía, 2024). El incremento en áreas de agricultura de riego o expansión agrícola intensiva aumenta la dependencia de fuentes permanentes para el abastecimiento de agua, -por ejemplo, la agricultura protegida-, lo que conlleva riesgos de sobreexplotación hídrica (Ochoa-Noriega Velasco, Aznar y López, 2022). En cuencas endorreicas, el desecamiento de lagos en el mundo (un tercio de su volumen) es atribuido a la agricultura de riego (Wine, 2024). Paralelamente, la urbanización propicia la disminución de la recarga potencial asociada a la impermeabilización de superficies (Guerrero-Morales, Fonseca, Gómez, Sampedro y Silva, 2020) y el incremento en la extracción de agua subterránea (Gachuz, Olea, Escolero y Medina, 2023). En este contexto, el monitoreo continuo de las dinámicas de cambio constituye un componente esencial para la gestión territorial sustentable, al proporcionar información clave que permite anticipar, evaluar y mitigar los impactos ambientales derivados de la modificación del paisaje (Mendoza, Granados, Geneletti, Pérez y Salinas, 2011).

En el estado de Jalisco, la distribución de las CUS para 2016 fue de bosques 56.5%, agricultura 29.8%, pastizales 9.2%, humedales 2.1% y asentamientos humanos 2.1% (CONAFOR, 2016). El sur del estado se distingue por su alta productividad agrícola, donde las unidades de producción tradicionales de maíz y caña de azúcar fueron reemplazadas progresivamente por cultivos de mayor rentabilidad o de exportación, como frutillas o "berries" y frutales. Este proceso impulsó el establecimiento de agronegocios con participación de actores extrarregionales, los cuales han transformado el paisaje rural y reducido la cobertura forestal, incluso en áreas con vocación forestal (Macías y Sevilla, 2021).

En esta porción del estado se ubica la Cuenca Laguna de Zapotlán (CLZ), cuyo principal núcleo urbano es Ciudad Guzmán, considerado un polo de desarrollo regional con destacada producción agrícola. En 2022, el valor de la producción agrícola se concentró principalmente en aguacate (52%), frambuesa (23%) y arándano (10%); mientras que la superficie cultivada correspondió en 42% al aguacate, 16% al maíz de grano y 13% a la frambuesa (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera o SIAP, 2023). Este auge agrícola propició la migración de la población hacia la región y contribuyó a la reducción de los índices de pobreza, los cuales se situaron por debajo de los promedios estatales y nacionales (IIEGJ, 2021a; IIEGJ 2021b; Macías y Sevilla, 2021).

La cuenca incluye parte del Parque Nacional Volcán Nevado de Colima, un área de alta relevancia ecológica por su biodiversidad y endemismos, que además provee servicios ecosistémicos esenciales, como la recarga del acuífero Ciudad Guzmán (Hernández-Juárez, Martínez, Peñuela y Rivera, 2020). En la parte baja se ubica la Laguna de Zapotlán, un humedal de 1496 ha designado como sitio Ramsar desde 2005 por su valor ambiental, económico y social (Servicio de Información sobre Sitios Ramsar, 2024). Este ecosistema presenta altos niveles de sedimentación, producto de la geomorfología escarpada, suelos altamente erosionables, deforestación en zonas de montaña y el crecimiento urbano de Ciudad Guzmán (Ortiz-Jiménez, 2006¹). Frente a estas condiciones socioambientales, el presente estudio tiene como objetivo caracterizar la dinámica espaciotemporal de las coberturas y usos del suelo en la Cuenca Laguna de Zapotlán, en un contexto de transformación agrícola.

En este trabajo, la cobertura del suelo se entiende como el material físico que compone la superficie terrestre, incluyendo bosques, cuerpos de agua y suelos desnudos (CONABIO, 2022). La cubierta vegetal se refiere al conjunto de plantas que ocupan una superficie determinada y que son susceptibles de representación cartográfica (INEGI, 2014), mientras que el uso del suelo alude a la actividad humana realizada en el territorio, independientemente de sus características físicas (CONABIO, 2022).

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del Área de Estudio

La Cuenca Laguna de Zapotlán (CLZ) comprende porciones de los municipios de Zapotlán el Grande, Gómez Farías y San Gabriel. Su superficie total es de 464.7 km² y presenta un rango altitudinal que oscila entre 1488 y 3880 metros sobre el nivel del mar (m de altitud). Desde el punto de vista hidrológico, se clasifica como una cuenca endorreica, al no contar con salida superficial hacia otros sistemas hidrográficos (Figura 1). En la parte baja se localiza la Laguna de Zapotlán, un cuerpo de agua con superficie aproximada de 13.76 km², profundidad media de 4.5 m y volumen de almacenamiento estimado en 27 millones de m³ (INEGI, 2019). El municipio de Zapotlán El Grande, principal asentamiento dentro de la cuenca, cuenta con población cercana a los 128 000 habitantes, de los cuales aproximadamente 90% reside en la cabecera municipal, que constituye el núcleo urbano dominante en la región.

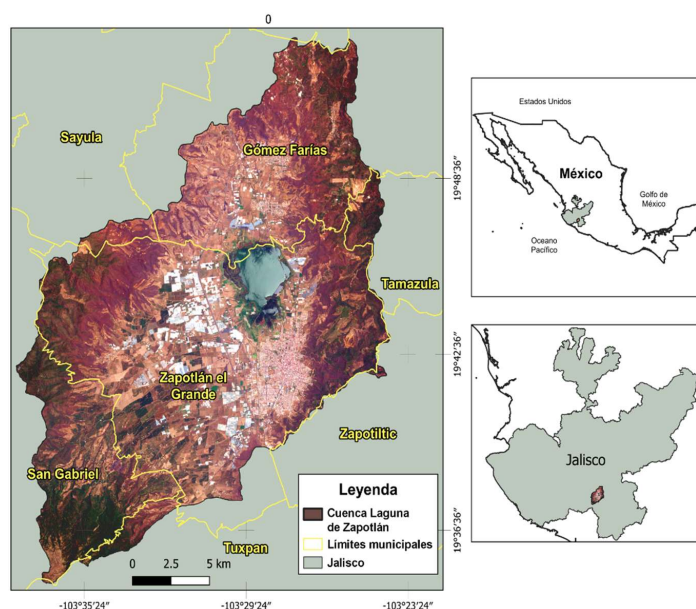


Figura 1. Límites y localización de la CLZ. Fuente: elaboración propia con información de INEGI y Agencia Espacial Europea (2023).

Figure 1. Boundaries and location of the CLZ. Source: Own elaboration based on information from INEGI and the European Space Agency (2023).

¹ Ortiz-Jiménez, J. M. A. (2006). *Modelo de nutrientes-cadena alimenticia para el lago de Zapotlán. Tesis doctoral. Posgrado Interinstitucional en Ciencias Ambientales (PICA), CONACYT. San Luis Potosí, México.*

El estudio de la dinámica de las CUS se realizó en dos etapas. La primera correspondió al periodo de 1976 a 2021 e incluyó el análisis de los cambios en las CUS entre la serie I y la serie VII de las cartas de Vegetación y Uso del Suelo de INEGI, es decir, sus pérdidas, ganancias y transiciones absolutas y relativas, así como el cálculo de la tasa de cambio pareada de la serie II a la VII. El objetivo de esta etapa fue identificar los patrones de cambio que dieron lugar a las CUS actuales.

La segunda etapa correspondió al año 2023 (considerado como el uso actual); su caracterización se basó en la interpretación visual de una imagen satelital, con el fin de diferenciar las CUS antrópicas de las naturales. No se realizó la comparación espacial entre ambos periodos debido a la diferencia de escalas.

De acuerdo con Palacio *et al.* (2002), la cartografía de la Serie I de INEGI (1997) se basa en fotografías aéreas con fecha promedio de 1976 (± 3 años), por lo que se utilizó el año 1976 como referencia para las estimaciones.

Dinámica de los Cambios en las CUS (1976-2021)

Para el análisis de la dinámica de cambio en las Coberturas y Usos del Suelo (CUS) se empleó el polígono de la subcuenca RH12 de Laguna de Zapotlán, obtenido del Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (INEGI, 2010), como área de referencia espacial. A partir de esta delimitación se ajustaron las coberturas vectoriales y ráster de los distintos conjuntos de datos empleados.

Se utilizaron los mapas digitales de Vegetación y Uso del Suelo de las series I a VII del INEGI (1997, 2001, 2005, 2009, 2013, 2016 y 2021), correspondientes a información base desde la década de 1970 (≈ 1976 para la Serie I). Todos los conjuntos fueron convertidos al sistema de referencia de coordenadas proyectadas Universal Transversa de Mercator (UTM), zona 13 norte, datum WGS84. El preprocesamiento cartográfico incluyó la identificación, reclasificación y homologación de las categorías de uso y cobertura a ocho clases principales (Figura 2), con el propósito de reducir la heterogeneidad semántica y los distintos niveles de especificidad entre series. Las series I a IV presentaron 17 clases cada una; la serie V incluyó 18; la serie VI, 20; y la serie VII, 23, lo que en conjunto representó 36 clases distintas de CUS.

Para garantizar la comparabilidad entre las series de Vegetación y Uso del Suelo del INEGI, se agrupó y reclasificó la información original siguiendo criterios de similitud temática basados en revisión bibliográfica y en las adaptaciones de Pineda-Jaimes, Bosque, Gómez y Plata (2009) y Romero *et al.* (2022). Como resultado, se definieron ocho clases de Cobertura y Uso del Suelo (CUS).

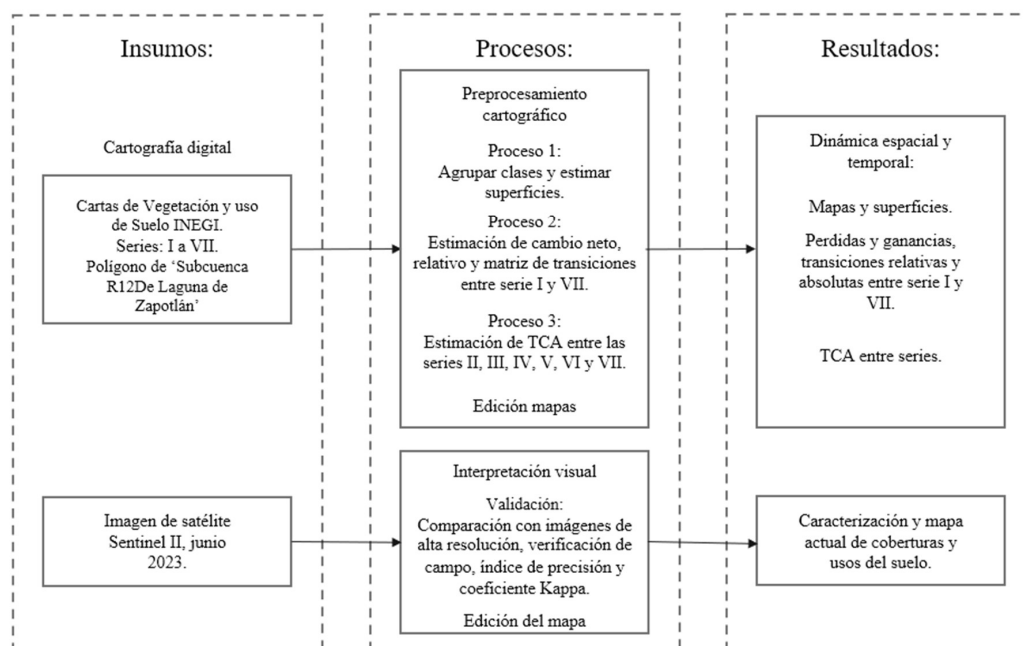


Figura 2. Procedimiento metodológico de la investigación. Fuente: elaboración propia.
Figure 2. Methodological procedure of the research. Source: Own elaboration.

Agricultura de temporal (At). Superficie dedicada a cultivos dependientes de las precipitaciones estacionales (INEGI, 2014). Incluye las clases de agricultura de temporal, de temporal anual, de temporal permanente y de temporal anual y permanente.

Agricultura de riego (Ar). Superficie destinada a cultivos con suministro de agua mediante sistemas de riego (INEGI, 2014). Incluye las clases de agricultura de riego, agricultura de riego anual, agricultura de riego anual y permanente, agricultura de riego anual y semipermanente, agricultura de riego permanente y desprovista de vegetación (esta última presente únicamente en la serie VII, correspondiente a áreas en preparación agrícola).

Pastizal inducido (PI). Cubierta herbácea dominada por gramíneas introducidas, manejada con fines de aprovechamiento pecuario extensivo (INEGI, 2014). Incluye la clase de pastizal inducido.

Asentamientos humanos (AH). Conglomerados demográficos que incluyen viviendas, servicios, terrenos baldíos y demás elementos urbanos (INEGI, 2014). Incluye las clases de asentamientos humanos, urbano construido y zona urbana.

Bosque (B). Ecosistema con al menos 10% de cobertura de copa arbórea, asociado a flora y fauna silvestres y a condiciones naturales del suelo, sin actividades agrícolas (FAO, 1995). Incluye las clases bosque de encino, bosque de encino-pino, bosque de oyamel, bosque de pino, bosque de pino-encino y bosque mesófilo de montaña y sus respectivas vegetaciones secundarias arbóreas y arbustivas. Asimismo, se incorporaron las clases selva baja caducifolia con matorral subinermé, vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia, vegetación secundaria arbustiva de matorral subtropical, vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia y matorral subtropical con matorral subinermé.

Pradera de alta montaña (VW). Vegetación herbácea no leñosa, de porte bajo y aspecto cespitoso, amacollado o arrosetado, con cobertura superior al 75%, localizada generalmente por encima de los 3500 m de altitud (López, Bocco, Mendoza, Velázquez y Aguirre, 2006). Incluye la clase pradera de alta montaña.

Vegetación hidrófila (VH). Asociaciones vegetales situadas en o contiguas a cuerpos de agua, representadas principalmente por colonias de tule (López *et al.*, 2006). Incluye la clase: Tular.

Agua y cuerpo de agua (H₂O). Cuerpos de agua permanentes o estacionales, representados por la laguna de Zapotlán y sus zonas inundables. Incluye la clase: cuerpo de agua.

Esta reclasificación temática permitió homogeneizar la base de datos espacial, mejorar la consistencia semántica entre series cartográficas y facilitar el análisis comparativo temporal de los cambios en la cobertura y uso del suelo entre 1976 y 2021.

Una vez homogeneizadas las clases de Cobertura y Uso del Suelo (CUS), se efectuaron dos tipos de análisis: una comparación espacial entre las series I y VI, y la estimación de la tasa de cambio entre los pares temporales SII-SIII, SIII-SIV, SIV-SV, SV-SVI y SVI-SVII.

Para cada serie se calculó la superficie (ha) correspondiente a cada clase y se construyó una base de datos geoespacial consolidada. Con esta información se estimaron los siguientes indicadores de cambio.

Cambio neto. Diferencia entre la superficie inicial y final por clase, expresada en hectáreas.

Cambio relativo. Variación porcentual del cambio neto respecto al valor inicial.

Tasa de cambio anual (TCA). Porcentaje de variación anual de cada clase, calculado con la fórmula propuesta por la FAO (1996).

$$t = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^{1/n} - 1 \quad (1)$$

Donde: t corresponde a la tasa de cambio anual, S_1 a la superficie en la fecha 1, S_2 a la superficie en la fecha 2 y n al número de años entre ambas fechas.

Además, se elaboró una matriz de transiciones (MT) para representar los cambios de cobertura y uso del suelo entre los distintos pares temporales, indicando el origen y destino de las superficies ganadas, perdidas o conservadas. La MT se generó mediante álgebra de mapas utilizando un algoritmo de intersección espacial, que permitió crear una capa con atributos asociados a las áreas de cambio y permanencia (Olaya, 2020²).

Los porcentajes de cambio se obtuvieron al convertir valores absolutos de la MT a formato porcentual, tomando como referencia la superficie inicial de cada clase con el fin de identificar la magnitud y dirección del cambio entre periodos.

² Olaya, V. (2020). Sistemas de información geográfica. <https://volaya.github.io/libro-sig/>

Posteriormente, se recalculó la Tasa de Cambio Anual (TCA) considerando a partir de la serie II a la VII (2001–2021), lo que permitió detectar los intervalos con mayores tasas de transformación entre las clases de CUS. Finalmente, se realizaron ajustes de consistencia temática debido a discrepancias en la clasificación original de algunas categorías.

Uso Actual del Suelo (2023)

Con el propósito de actualizar la información sobre las Coberturas y Usos del Suelo (CUS) en la cuenca, se utilizó imagen satelital Sentinel-2, adquirida el 11 de junio de 2023 con una resolución espacial de 10 × 10 m por píxel (2416×3438 píxeles) y cobertura nubosa inferior al 15%. Se procesaron tres bandas espectrales (banda 2 azul, banda 4 roja y banda 8 infrarroja cercana (NIR)) para generar composición en falso color (Agencia Espacial Europea, 2023).

El análisis se llevó a cabo mediante interpretación visual (escala 1:20 000), siguiendo los lineamientos metodológicos de la FAO (2001), los cuales consideran características morfológicas y topográficas como tono, forma, tamaño y textura. Este procedimiento permitió incrementar la precisión temática y espacial de la cartografía, al utilizar la capa de la serie VII como guía para la digitalización (Ramos-Reyes, Palomeque, Megía y Landeros, 2021). La interpretación incluyó la detección, reconocimiento e identificación primaria de objetos, delimitación y clasificación, creación de leyenda, estimación de superficies y evaluación de la exactitud.

Se mantuvieron las clases previamente definidas, incorporando ajustes para reflejar las condiciones actuales observadas en la cuenca. La clase "pastizal inducido" fue eliminada debido a su escasa presencia en la imagen de 2023, mientras que "agricultura de temporal" y "agricultura de riego" se agruparon en una sola categoría denominada "agricultura (A)", por la complejidad para diferenciarlas. Se añadieron dos nuevas clases: "desprovisto de vegetación (DV)" y "agricultura protegida (AP)", esta última referida a cultivos bajo estructuras de plástico o malla sombra (SADER, 2020).

La verificación de la exactitud de la clasificación se realizó mediante el complemento AcATaMa (Accuracy Assessment Tool for thematic Maps) de QGIS Project (2023), generando 50 puntos de validación por clase distribuidos de manera aleatoria estratificada. Cada punto fue contrastado con la interpretación visual de imágenes de alta resolución de Google Earth (marzo de 2023) y con observaciones de campo georreferenciadas. A partir de la matriz de confusión, se obtuvo una precisión global de 91.7% y coeficiente Kappa de 0.91, valores que indican una clasificación confiable conforme a los estándares de la FAO (1995) y Congalton y Green (2019).

La información obtenida a partir de los diferentes periodos analizados, junto con la actualización del uso del suelo para 2023, permitió conformar una base cartográfica homogénea y estandarizada, adecuada para el análisis espacial y temporal de los patrones de cambio en las coberturas y usos del suelo de la Cuenca Laguna de Zapotlán. Esta base constituye el insumo principal para la identificación de tendencias de transformación del paisaje durante el periodo 1976–2023.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dinámica de las CUS entre 1976 y 2021

Los principales cambios en las Coberturas y Usos del Suelo (CUS) durante el periodo 1976–2021 correspondieron a la conversión de agricultura de temporal a agricultura de riego, la reducción de pastizales inducidos y la expansión de asentamientos humanos (Cuadro 1). La agricultura de riego (Ar) presentó el mayor incremento en superficie, con ganancia de 9721 ha, lo que representa más del doble de su extensión inicial. Este aumento refleja un proceso sostenido de intensificación agrícola, asociado al mayor acceso a infraestructura hídrica y tecnologías de riego.

Por su parte, los asentamientos humanos (AH) mostraron el mayor cambio relativo, con incremento de 214.2%, al pasar de 601 ha a 1288 ha, evidenciando la expansión urbana del principal núcleo poblacional en la cuenca. Entre las coberturas naturales, la Pradera de alta montaña (VW) fue la única clase que registró crecimiento significativo, al duplicar su superficie durante el periodo de estudio. Este comportamiento puede atribuirse a procesos de regeneración natural en áreas de gran altitud o a ajustes en la delimitación cartográfica en las series más recientes.

En cuanto a la disminución de superficie, los resultados mostraron que la agricultura de temporal (At) registró la mayor reducción durante el periodo de estudio, con pérdida neta de 8571.5 ha, equivalente a cambio relativo de -84.5%. Esta tendencia refleja sustitución progresiva de sistemas agrícolas tradicionales por modalidades de mayor intensificación y tecnificación, como la agricultura de riego.

Cuadro 1. Cambios en la superficie de las coberturas y usos del suelo (CUS) entre las series I y VII (1976-2021).
Table 1. Changes in land cover and land use (LC/LU) area between Series I and VII (1976-2021).

	SI		SVII		Ganancia o pérdida		Cambio	
	ha	%	ha	%	ha	%		%
Agricultura de temporal	10 142	21.7	1570	3.4	- 8571		- 84.5	
Agricultura de riego	9183	19.7	18 909	40.5	9721		105.9	
Pastizal Inducido	2208	4.7	473	1	-1735		- 78.6	
Asentamientos Humanos	601	1.3	1889	4	1288		214.2	
Bosque	22 487	48.1	21 498	46	- 989		- 4.4	
Pradera de alta montaña	104 [†]	0.2	216	0.5	112		107.9	
Cuerpo de agua	845 [‡]	1.8	749	1.6	- 96		-11.4	
Vegetación hidrófila	580 [‡]	1.2	725	1.6	146		25.1	

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI. [†] La superficie 104 ha corresponde a la serie II (2001) debido a que no está representada en la serie I. [‡] Las superficies 579.8 ha y 845.3 ha corresponden a la serie VI (2016).

Source: Own elaboration based on INEGI data. [†] The area of 104 ha corresponds to Series II (2001) because it is not represented in Series I. [‡] The areas of 579.8 ha and 845.3 ha correspond to Series VI (2016).

El pastizal inducido (PI) también presentó disminución significativa, con pérdida de 1734.8 ha, equivalente a reducción de 78.6% respecto a su extensión inicial. Este comportamiento puede asociarse al cambio de uso hacia cultivos agrícolas o zonas urbanizadas, así como al abandono de actividades pecuarias extensivas en áreas de baja rentabilidad. La cobertura de bosque (B), registró pérdida neta más moderada, de 989.4 ha (-4.4%). Esta tendencia podría explicarse por procesos de fragmentación, expansión agrícola marginal o reclasificaciones cartográficas derivadas de diferencias en la resolución de las series analizadas.

En relación con el cuerpo de agua y la vegetación hidrófila, el análisis se limitó al periodo comprendido entre la Serie VI (2016) y la Serie VII (2021), debido a la heterogeneidad en la clasificación de las series anteriores. En este intervalo, el cuerpo de agua mostró reducción de 96 ha, mientras que la vegetación hidrófila aumentó 145 ha. Sin embargo, esta dinámica debe interpretarse con cautela, ya que la extensión de la laguna de Zapotlán está fuertemente condicionada por fluctuaciones climáticas e hidrológicas, como la variabilidad interanual de las precipitaciones y la evapotranspiración estacional. Por ello, la identificación de tendencias robustas en su volumen y superficie requiere de un monitoreo hidrológico continuo y series temporales más extensas que integren variables meteorológicas y de nivel freático.

Los cambios observados en las Coberturas y Usos del Suelo (CUS) entre la Serie I (1976) y la Serie VII (2021) evidencian reconfiguración de los usos del territorio más que pérdida neta de cobertura natural. Destaca particularmente la transición de la agricultura de temporal a la agricultura de riego en la parte baja de la cuenca, la cual refleja el auge agroindustrial regional asociado con la expansión de sistemas agrícolas intensivos y tecnificados.

Este proceso se encuentra estrechamente vinculado con el crecimiento de los asentamientos humanos, cuya superficie se triplicó durante el periodo analizado (Figura 3). De manera paralela, la población de la Cuenca Laguna de Zapotlán aumentó 53.4%, pasando de 85 767 habitantes en 1990 a 131 572 en 2020 (IIEGJ 2025). Esta tendencia muestra la expansión urbana y la concentración de la demanda de agua en los principales núcleos poblacionales, así como la consolidación de infraestructura asociada al crecimiento económico y al desarrollo agroindustrial de la región. En conjunto, estos procesos reflejan las dinámicas de transformación territorial que han moldeado la CLZ en las últimas décadas.

Durante el periodo 1976-2021, aproximadamente 36% de la superficie de la Cuenca Laguna de Zapotlán (CLZ) experimentó cambios en las Coberturas y Usos del Suelo (CUS), los cuales no fueron uniformes ni en el tiempo ni entre clases. Este grado de transformación coincide con los valores reportados por Pérez-Vega, Regil-García y Mas (2020) para el estado de Guanajuato, quienes documentaron una dinámica similar, aunque en un intervalo temporal más corto (2003-2015), lo que confiere al presente estudio mayor amplitud y detalle temporal.

De manera análoga, López-Vázquez, Balderas, Chávez, Juan y Gutiérrez (2015) y Muñoz-Villers y López-Blanco (2010) reportaron variaciones cercanas a 49% en regiones del Altiplano central y en la cuenca del río La Antigua, respectivamente, aunque sus resultados corresponden a intervalos temporales más reducidos.

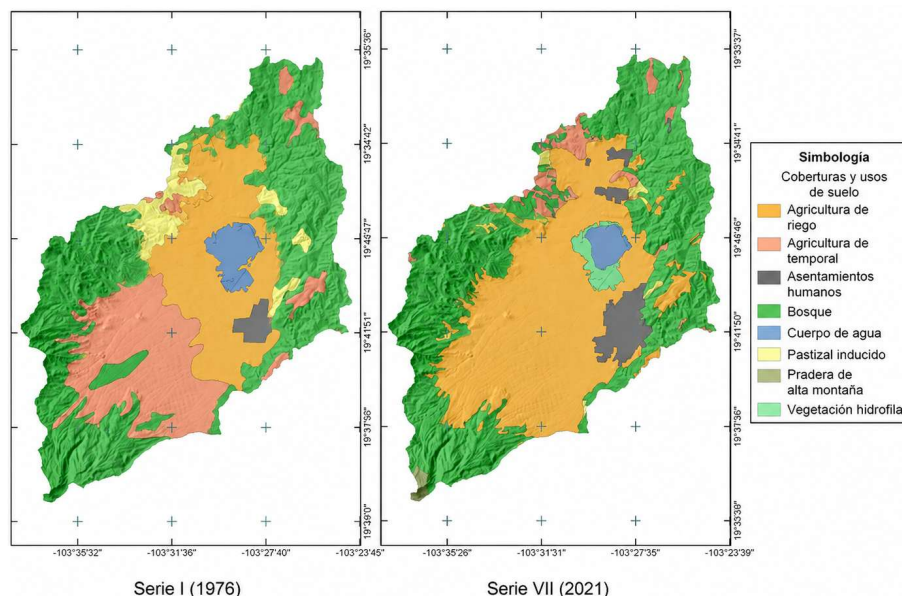


Figura 3. Transición de las coberturas y usos del suelo entre la Serie I (1976) y la Serie VII (2021) en la Cuenca Laguna de Zapotlán (CLZ). Fuente: Elaboración propia con información de INEGI (1976 y 2021).

Figure 3. Transition of land cover and land use between Series I (1976) and Series VII (2021) in the Zapotlán Lagoon Basin (ZLB). Source: Own elaboration based on information from INEGI (1976 and 2021).

Por su parte, Palomeque-de la Cruz *et al.* (2025) documentaron procesos de cambio de uso del suelo asociados a la expansión agrícola y transformación del paisaje en Tenosique, Tabasco, lo que confirma la consistencia de los procesos de transformación del uso del suelo en distintas regiones del país.

En el contexto estatal, el porcentaje de cambio registrado en la CLZ se sitúa por encima de 23% documentado por López-Pérez y Cruz-Romero (2020) en el municipio de Tomatlán, donde se localiza un Distrito de Riego con intensa actividad agrícola y condiciones climáticas cálidas. Estas comparaciones destacan que, aun en cuencas con distintos contextos fisiográficos y socioeconómicos, los procesos de intensificación agrícola y expansión urbana constituyen los principales motores de cambio del uso del suelo en el occidente de México.

Los cambios en las CUS se distribuyeron de manera amplia y heterogénea en toda la cuenca, influenciados tanto por la topografía como por la expansión de las actividades agrícolas. La cobertura forestal mostró pérdida significativa en zonas de piedemonte y en fragmentos aislados de montaña, lo que contribuyó a mayor fragmentación y reducción de la conectividad ecológica. Este patrón sugiere que, al alcanzarse el límite de la frontera agrícola, se promovió la ocupación de nuevas áreas en laderas y zonas de transición, incrementando la presión sobre los ecosistemas naturales.

Casi la mitad de los pastizales inducidos, ubicados en el sector noroeste de la cuenca fueron abandonados, lo que permitió la regeneración natural de la vegetación en áreas de cañadas; en contraste, los lomeríos fueron transformados en zonas agrícolas, reflejando proceso de reocupación diferenciada del territorio. Los asentamientos humanos mostraron crecimiento radial, con Ciudad Guzmán expandiéndose hacia las laderas y antiguas áreas agrícolas, fenómeno que incrementa la presión sobre el suelo y los recursos hídricos.

En las zonas bajas, la agricultura de riego sustituyó progresivamente a la agricultura de temporal, mientras que en algunas áreas boscosas se observó la aparición de nuevos cultivos, lo que aumenta la presión sobre los ecosistemas forestales y acelera los procesos de fragmentación. La agricultura en zonas de montaña enfrenta los mayores riesgos de erosión del suelo, debido al cultivo en pendientes no aptas para la producción agrícola (Krishna-Bahadur, 2012; Mellado, Mello y Curi, 2021; Carreño, Delgado y Vivas, 2025). Esta condición se manifiesta en la acumulación de sedimentos en la Laguna de Zapotlán, donde los azolves derivados de la erosión contribuyen a la disminución de su profundidad y capacidad de almacenamiento (Ortiz-Jiménez, 2006¹).

La comparación de series de INEGI presentó algunas inconsistencias temáticas, como la homogeneización de la leyenda entre las series I y VII, pero aun con estas dificultades, los resultados evidenciaron la actual realidad de la cuenca. Por ejemplo, el cambio de agricultura de temporal a riego fue el cambio más significativo y es un

hecho que se pudo corroborar con los recorridos de campo y con los informes del SIAP de la región, además de ser un hecho documentado por Macías y Sevilla (2021). Las inconsistencias espaciales sólo podrían ser una limitante parcial en el cálculo de las tasas de cambio, por error humano o tecnológico, debido al cambio en las técnicas para la adquisición de información y su procesamiento, situación evidenciada por Palacio *et al.* (2002).

Matriz de Transiciones

La matriz de transiciones indica que 63.7% de la superficie de la Cuenca Laguna de Zapotlán (29 328 ha) permaneció sin cambios entre 1976 y 2021, mientras que 36.2% (16 678 ha) experimentó 19 transiciones entre diferentes clases de cobertura. Las transiciones relevantes se registraron en agricultura de temporal y bosque, que cedieron 8379 ha y 2316 ha, respectivamente, hacia agricultura de riego, confirmando el avance sostenido de sistemas agrícolas intensivos en la parte baja de la cuenca. En conjunto, estas clases –junto con pastizal inducido– contribuyeron a que la agricultura de riego alcanzara la mayor ganancia neta, con 1200 ha adicionales durante el periodo analizado.

La cobertura de bosque perdió en total 3413 ha hacia otras categorías, aunque recuperó 2528 ha, conservando la mayor extensión territorial (18 970 ha) al final del periodo. Por su parte, los asentamientos humanos mostraron incremento de 1317 ha, principalmente a expensas de áreas agrícolas de riego, lo que evidencia un proceso de urbanización regional continuo y mayor presión sobre las zonas productivas (Cuadro 2).

Si bien, la agricultura de riego incrementó su superficie en 9721 ha, el crecimiento neto agrícola fue de apenas 1149.5 ha, debido a la sustitución directa de la agricultura de temporal por riego. Procesos análogos han sido documentados en Veracruz (Muñoz-Villers y López-Blanco, 2010) y en el altiplano del Estado de México (López-Vázquez *et al.* 2015), donde este tipo de transformaciones se relaciona con políticas agrarias y la orientación hacia cultivos de mayor rentabilidad, fenómeno también observado en la Cuenca Laguna de Zapotlán (CLZ).

Transiciones Relativas entre Clases de CUS

Las distintas clases de Cobertura y Uso del Suelo (CUS) mostraron grados variables de susceptibilidad al cambio, lo que permitió identificar su estabilidad temporal durante el periodo de análisis. Considerando 1976 como año base, se evaluó el porcentaje de superficie que cada clase transfirió hacia otras categorías para 2021, así como la proporción que permaneció sin transiciones.

Las clases con mayor inestabilidad fueron la agricultura de temporal y el pastizal inducido, que cedieron 96.7% y 88.4% de su superficie, respectivamente. La primera se transformó principalmente en agricultura de riego, mientras que los pastizales inducidos transfirieron casi la mitad de su extensión (48.8%) al bosque, reflejando procesos de sucesión secundaria o abandono de áreas pecuarias.

Cuadro 2. Matriz de transiciones de las coberturas y usos del suelo entre la Serie I (1976) y la Serie VII (2021) en la Cuenca Laguna de Zapotlán (CLZ).

Table 2. Transition matrix of land cover and land use between Series I (1976) and Series VII (2021) in the Zapotlán Lagoon Basin (ZLB).

CUS Serie I, año 1976	CUS Serie VII, año 2021							Total 1976	
	AT	AR	PI	AH	B	VW	H ₂ O	ha	%
AT	336	8379	29	14	1383			10 142	22
AR	229	7703		1095	66		88.4	9183	20
PI	349	457	256	67	1078			2208	4.8
AH		29		572				601	1.3
B	656	2316	188	140	18,970	112		22,383	48.6
VW						104		104	0.2
H ₂ O		18					1386	1404	3.1
Total 2021	ha	1570	18 904	473	1889	21 497.9	216	1474.2	46 024
	%	3.4	41.1	1	4.1	46.7	0.5	3.2	100

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI.

Source: Own elaboration based on INEGI data.

La afinidad funcional y espacial entre clases favoreció patrones específicos de transición, particularmente en el sector agrícola, donde predominan los cambios vinculados con las técnicas de producción. En conjunto, la agricultura de temporal se convirtió en 82.6% en agricultura de riego y 13.6% en bosque, mientras que el pastizal inducido transitó hacia bosque 48.8% y hacia agricultura de riego 20.7% (Cuadro 3). Estos resultados evidencian un proceso de intensificación agrícola en la cuenca, en el cual la agricultura de riego ha sustituido progresivamente a los sistemas de temporal y pastizales inducidos, debido a su mayor rentabilidad y productividad, consolidándose como el uso dominante del suelo en las áreas de mayor aptitud agroindustrial.

Velocidad de Cambio en las CUS entre Series II a VII

Los cambios en las Coberturas y Usos del Suelo (CUS) no fueron uniformes en el tiempo ni consistentes entre series o clases, lo que evidencia una dinámica territorial variable a lo largo del periodo analizado. La comparación pareada entre las series permitió estimar las Tasas de Cambio Anual (TCA) y determinar los intervalos de mayor transformación. Las mayores TCA negativas se registraron en la agricultura de temporal, con pérdida anual de 44.8% entre series V y VI (2013-2016), y en los pastizales inducidos, con reducción de 39.9% en el mismo periodo. En contraste, la agricultura de riego mostró crecimiento acelerado, con TCA de 23.4%, mientras que los asentamientos humanos aumentaron a tasa de 8.2% anual.

Estos resultados indican que el intervalo entre las series V y VI representó el periodo de mayor intensidad en la transformación del uso del suelo, asociado a la expansión de sistemas agrícolas intensivos y al crecimiento urbano en la cuenca. Las clases cuerpos de agua y vegetación hidrófila fueron excluidas del análisis general, dado que su TCA solo pudo evaluarse para el intervalo VI y VII (2016-2021) (Figura 4).

Las mayores tasas de cambio se registraron entre 2013 y 2016 (series V-VI), periodo en el que el INEGI documentó conversión masiva de agricultura de temporal a agricultura de riego, así como el abandono de 80% de los pastizales inducidos. De acuerdo con Macías y Sevilla (2021), entre 2003 y 2018, en el municipio de Zapotlán el Grande, la superficie destinada al cultivo de maíz de grano disminuyó en 91.3% (8445 ha), siendo reemplazada por aguacate, frutillas (*berries*) y maíz forrajero, principalmente en predios de productores medianos y grandes. En contraste, los pequeños agricultores optaron por rentar o vender sus tierras a las agroempresas, generando un cambio estructural en el sistema agrícola regional, impulsado por la dinámica de los mercados locales y globales.

Uso Actual del Suelo 2023

En 2023, 47.8% de la superficie de la Cuenca Laguna de Zapotlán (CLZ), equivalente a 21 908 ha, presentaba uso agrícola, dentro del cual la agricultura protegida ocupaba 8% (3668 ha). Las áreas agrícolas se distribuyen ampliamente a lo largo de la planicie central, extendiéndose hacia las laderas e incluso invadiendo zonas boscosas. Se identificaron 2663 ha de huertas que contribuyen a la fragmentación del bosque, con superficies que van desde dos hectáreas (Figura 5).

Cuadro 3. Variación porcentual de las coberturas y usos del suelo en la Cuenca Laguna de Zapotlán con respecto a 1976.
Table 3. Percentage variation of land cover and land use in the Zapotlán Lagoon Basin relative to 1976.

CUS	AT	AR	PI	AH	B	VW	H2O	Cambio %
AT	P	82.6	0.3	0.1	13.6			96.7
AR	2.5	P		11.9	0.7		1.0	15.1
PI	15.8	20.7	P	3.0	48.8			88.4
AH		4.9		P				4.9
B	2.9	10.3	0.8	0.6	P	0.5		15.2
VW						P		-
H2O		1.3					P	1.3

P = permanencias. Fuente: elaboración propia con datos de INEGI, los datos en la diagonal son las permanencias.
P = persistence. Source: Own elaboration based on INEGI data; values on the diagonal represent persistence.

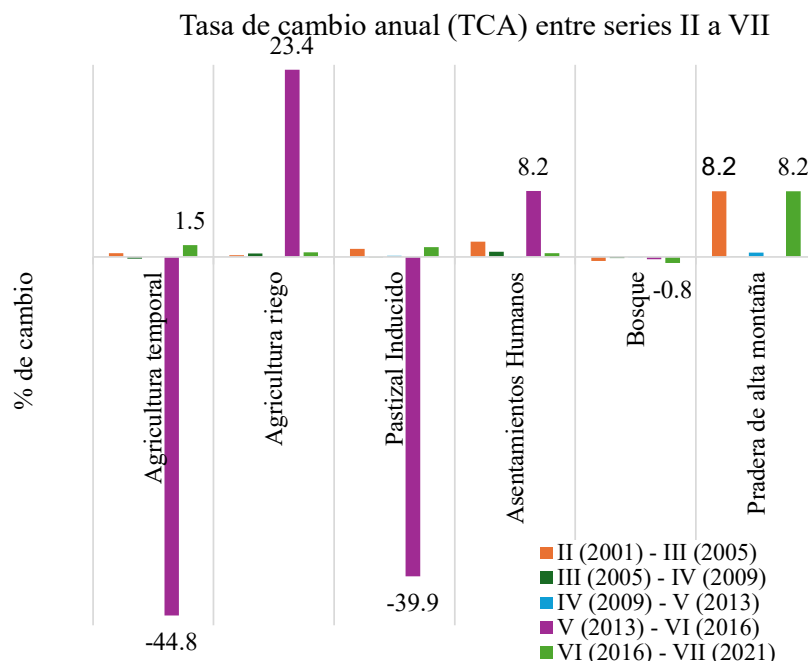


Figura 4. Tasa de Cambio Anual (TCA) de las coberturas y usos del suelo entre las Series II y VII (2001-2021) en la Cuenca Laguna de Zapotlán (CLZ). Fuente: elaboración propia con datos de INEGI.

Figure 4. Annual Change Rate (ACR) of land cover and land use between Series II and VII (2001-2021) in the Zapotlán Lagoon Basin (ZLB). Source: Own elaboration based on INEGI data.

La agricultura protegida se concentra principalmente en el centro de la cuenca, especialmente en el municipio de Zapotlán el Grande, conformada por parcelas con macrotúneles, estructuras modulares que recubren grandes superficies con plástico o malla sombra, adaptables a modificaciones según las etapas fenológicas del cultivo. Si bien la variabilidad en el manejo agronómico puede dificultar su detección –pues los plásticos o mallas se extienden o recogen según la temporada–, estas áreas se distinguen visualmente por sus patrones regulares de franjas paralelas y homogéneas.

Las zonas boscosas ocupan 41.8% de la CLZ (19 248 ha) y comprenden tanto bosques templados como bosques tropicales caducifolios, en su mayoría acompañados por vegetación secundaria. Estas formaciones se distribuyen en dos franjas montañosas que rodean la llanura agrícola. La franja oriental, que abarca los municipios de Zapotlán y Gómez Farías, presenta parches agrícolas dispersos que fragmentan la cobertura forestal. En la franja occidental, que comprende partes de San Gabriel y Zapotlán, zona del volcán Colima, se observa una frontera agrícola con penínsulas de cultivo que se adentran entre laderas de fuerte pendiente, aumentando el riesgo de erosión.

Los asentamientos humanos ocupan 6.1% de la superficie (2793 ha) y se concentran en tres localidades principales: Ciudad Guzmán (2038 ha), San Sebastián del Sur (192 ha) y San Andrés Ixtlán (173 ha). Además, se registran rancherías y asentamientos dispersos como Atequizayán, Cofradía del Rosario, El Fresnito, La Mesa, El Rodeo y Los Depósitos, que mantienen un patrón de ocupación discontinua.

El cuerpo de agua principal y la vegetación hidrófila conforman un humedal de 1648 ha, equivalente a 3.6% de la cuenca, integrado por 943 ha de lámina de agua y 705 ha de vegetación acuática. En junio de 2023, su extensión fue similar a las 1673 ha reportadas por INEGI (2019), aunque mayor que las 1109.3 ha documentadas por Ortiz-Jiménez (2006¹) y a las 1496 ha registradas en la Ficha Ramsar (2005) (Servicio de Información sobre Sitios Ramsar, 2024). Estas variaciones reflejan la dinámica natural del nivel del agua, influenciada tanto por la estacionalidad climática como por factores antrópicos –como el cambio climático y las modificaciones en el manejo de la cuenca– que alteran la disponibilidad y temporalidad de las precipitaciones, principales fuentes de recarga superficial de la laguna.

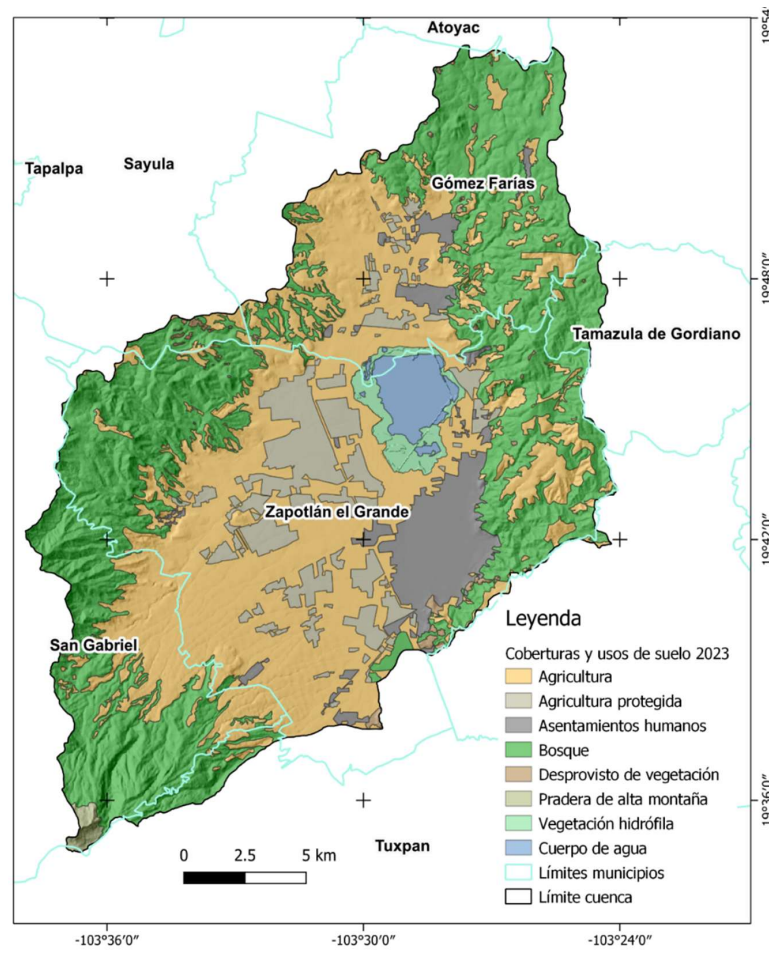


Figura 5. Coberturas y usos del suelo en la Cuenca Laguna de Zapotlán (CLZ), 2023. Fuente: Elaboración propia con información de INEGI (2021) y Agencia Espacial Europea (2023).

Figure 5. Land cover and land use in the Zapotlán Lagoon Basin (ZLB), 2023. Source: Own elaboration based on information from INEGI (2021) and the European Space Agency (2023).

La pradera de alta montaña, ubicada en la parte superior de la cuenca y dentro del Área Natural Protegida (ANP) Parque Nacional Volcán Nevado de Colima, representó 0.4% de la superficie (189 ha), valor inferior al registrado en la serie VII (216 ha) pero superior al de la serie VI (146 ha). Finalmente, las áreas sin vegetación sumaron 238 ha (0.5%) e incluyen bancos de materiales, suelos desnudos erosionados y terrenos en preparación agrícola, los cuales evidencian procesos activos de degradación y transformación del suelo.

El aumento de la pradera de alta montaña en la Cuenca Laguna de Zapotlán (CLZ) resulta inusual en un contexto generalizado de degradación de los ecosistemas naturales. En contraste, Galicia y Rodríguez-Bustos (2016) documentaron reducción significativa de esta cobertura en el Parque Nacional Izta-Popo, atribuida a procesos de aforestación artificial y expansión agrícola, mientras que Romero *et al.* (2022) reportaron pérdidas similares en Puebla por la conversión de áreas naturales en zonas de cultivo.

En la CLZ, los pastizales inducidos prácticamente desaparecieron hacia 2023, al transformarse principalmente en áreas agrícolas o en vegetación secundaria natural. Este patrón difiere del observado en otras regiones: en Izta-Popo, Galicia y Rodríguez-Bustos (2016) atribuyeron su reducción a la regulación ganadera dentro del área protegida, mientras que, en el altiplano mexicano, López-Vázquez *et al.* (2015) reportaron incremento de estos pastizales debido al abandono de tierras agrícolas.

Por su parte, los bosques redujeron su extensión de 46% en la serie VII (2021) a 41.9% en 2023, lo que evidencia un proceso activo de deforestación y tendencias locales de fragmentación y presión agrícola preocupantes.

La conservación forestal es esencial para mantener las funciones ecológicas y los servicios ambientales que sustentan el bienestar de las comunidades locales. En este sentido, el mapeo detallado de las CUS constituye una herramienta clave para identificar patrones espaciales de transformación y monitorear los cambios en el paisaje a lo largo del tiempo (Megia-Vera *et al.*, 2025).

Finalmente, el cuerpo de agua y la vegetación hidrófila que conforman el humedal Ramsar Laguna de Zapotlán enfrentan presiones derivadas de los cambios en el uso y cobertura del suelo. Este humedal posee alta relevancia ecológica y social, por lo que resulta indispensable desarrollar estudios específicos sobre su dinámica lacustre, con el fin de preservar su integridad ecológica y mantener los servicios ecosistémicos que provee frente a las actividades humanas y el cambio climático.

La transformación agrícola en la Cuenca Laguna de Zapotlán (CLZ) tiene efectos directos sobre el recurso hídrico, ya que la agricultura de riego depende de fuentes permanentes de abastecimiento y permite cultivos durante todo el año. Gómez-Tagle *et al.* (2022) documentaron cómo el cultivo de aguacate de riego en Michoacán tiene huella hídrica 2.5 veces mayor que la de las plantaciones de temporal. En la cuenca, el agua subterránea constituye la principal fuente de riego, lo que genera presión creciente sobre el acuífero Ciudad Guzmán, sobre el cual se asienta la mayor parte de la cuenca. De acuerdo con CONAGUA (2024), este acuífero presenta déficit de -31 040 755 m³, situación que subraya la necesidad de evaluar los impactos del crecimiento agrícola en la disponibilidad hídrica.

La agricultura protegida ha experimentado una expansión acelerada. Housni, Macías, Magaña, Bracamontes y Najine (2015) reportaron 350 ha en 2010 y 1250 ha en 2015 en el municipio de Zapotlán el Grande, mientras que el INEGI, a partir de la Serie VII, la registró como agricultura de riego anual. En este estudio se identificó, para 2023, una superficie de 3668.2 ha –equivalente a 8% de la CLZ–, lo que representa un incremento superior a diez veces en apenas 13 años.

Los cambios en las coberturas y usos del suelo (CUS) impactan todos los procesos del ciclo hidrológico, en particular la infiltración, la escorrentía y la percolación. Diferentes usos del suelo modifican la retención y disponibilidad de agua en el suelo (Ghaffari, Keesstra, Ghodousi y Ahmadi, 2010; Mewded, Abebe, Tilahun y Agide, 2021), mientras que la conversión de bosques altera los patrones de evapotranspiración y recarga subterránea (Meli, Ellison, Ferraz, Filoso y Brancalion, 2024). Además, la respuesta hidrológica de las cuencas no es lineal, sino que presenta umbrales críticos, de modo que cambios relativamente pequeños en la cobertura pueden generar efectos desproporcionados sobre la salud hidrológica del sistema (Ghaffari *et al.* 2010).

Las áreas agrícolas, incluso en condiciones de pendiente, muestran menor infiltración y mayor escurrimiento que los bosques (Lozano-Trejo *et al.*, 2020). En la CLZ, la sedimentación en la Laguna de Zapotlán se asocia a factores como topografía escarpada, deforestación, sustitución de vegetación nativa por cultivos y crecimiento urbano, además de los movimientos de suelo para la preparación de terrenos agrícolas (Ortiz-Jiménez, 2006¹).

En conjunto, la expansión y transformación agrícola constituyen procesos antropogénicos que alteran el ciclo hidrológico. La agricultura intensiva en la CLZ depende cada vez menos del temporal y más de fuentes de agua gestionadas artificialmente, lo que otorga a los productores control directo sobre la disponibilidad del recurso (Ochoa-Noriega *et al.*, 2022). Sin embargo, este modelo implica un riesgo creciente de sobreexplotación de los acuíferos y competencia por el agua entre usuarios agrícolas y de uso público urbano, particularmente en un contexto donde los grandes productores poseen mayor capacidad de extracción y gestión que los usuarios domésticos y comunales.

CONCLUSIONES

El análisis comparativo de las siete series de Uso del Suelo y Vegetación (USV) de INEGI y las CUS del año 2023 permitió identificar espacial y temporalmente los cambios ocurridos en la Cuenca Laguna de Zapotlán (CLZ) durante el periodo 1976–2023, así como las tendencias y problemáticas emergentes derivadas de la continuidad de los procesos de transformación territorial actuales. Los resultados evidencian un conjunto de patrones de cambio que han modificado significativamente el paisaje de la cuenca en los últimos años. El cambio más importante corresponde a la expansión de la agricultura de riego. Más de un tercio de la cuenca experimentó transiciones entre diferentes CUS, siendo las mayores tasas de cambio anual (TCA) las registradas entre las Series V y VI (2013–2016) y coincidiendo con la expansión más acelerada de la agricultura intensiva y los asentamientos humanos. Para 2023 47.8% (21 908 ha) de la superficie de la CLZ correspondía a uso agrícola, incluyendo 8% (3668 ha) de agricultura protegida, mientras que los asentamientos humanos ocupaban el 6.1% (2793 ha). En conjunto, los usos antropogénicos cubren el 53.9% del territorio, evidenciando una fuerte presión sobre los ecosistemas naturales.

Estas transformaciones impactan de manera directa los ecosistemas, los sistemas hidrológicos y los servicios ambientales, con efectos particularmente sensibles debido a la condición endorreica de la cuenca. La conversión de agricultura de temporal a riego implica un aumento significativo en la extracción de agua subterránea, por lo que resulta prioritario evaluar la disponibilidad actual de los recursos hídricos. Aunque la superficie urbana es relativamente menor, la concentración poblacional en Ciudad Guzmán incrementa las demandas domésticas de agua, agravando la presión sobre el acuífero Ciudad Guzmán, actualmente con déficit reportado por CONAGUA.

En términos metodológicos, los procedimientos empleados demostraron su viabilidad para disgregar los cambios espaciales y temporales de las CUS, permitiendo contextualizar la configuración actual del paisaje. La leyenda cartográfica resultó eficaz para identificar los procesos de transformación agrícola y expansión urbana, mientras que la interpretación visual sobre imágenes Sentinel-2 permitió detectar cambios recientes con mayor resolución espacial que las series oficiales. El enfoque del análisis de cambios buscó evidenciar el cambio en los usos de la tierra, principalmente el cambio agrícola en la región, debido al detonante de esta actividad en el sur de Jalisco.

A partir de los hallazgos obtenidos, se recomienda mantener un monitoreo continuo de las CUS y utilizar esta información para orientar la planificación territorial, identificando áreas potenciales de conservación y restauración. Asimismo, se propone evaluar la disponibilidad hídrica y la dinámica lacustre del humedal Ramsar Laguna de Zapotlán, promoviendo estrategias de gestión integral que consideren la relación entre producción agrícola, urbanización y conservación ambiental. Finalmente, resulta esencial fomentar la conciencia socioambiental sobre los efectos de la agricultura intensiva y promover una transición hacia modelos sostenibles de uso del suelo que garanticen la resiliencia ecológica y social de la cuenca.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

Todos los autores han leído y aprobado el manuscrito final y han dado su consentimiento para su publicación.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados y analizados durante el presente estudio están disponibles a pedido razonable del autor correspondiente.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

FINANCIACIÓN

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: M.R.B.A. y L.M.M.R.; Metodología: M.R.B.A., L.M.M.R., F.P.R. y O.G.C.H.; Software: F.P.R. y O.G.C.H.; Validación: M.R.B.A., L.M.M.R., F.P.R. y O.G.C.H.; Análisis formal: M.R.B.A., L.M.M.R., F.P.R. y O.G.C.H.; Investigación: M.R.B.A. y L.M.M.R.; Recursos: M.R.B.A., L.M.M.R., F.P.R. y O.G.C.H.; Curación de datos: M.R.B.A., L.M.M.R., F.P.R. y O.G.C.H.; Escritura - preparación del borrador original: M.R.B.A.; Escritura - revisión y edición: L.M.M.R., F.P.R., O.G.C.H. y C.R.E.A.; Visualización: L.M.M.R.; Supervisión: L.M.M.R.; Administración del proyecto: L.M.M.R.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los revisores por las sugerencias en la mejora de esta investigación. MRBA agradece al programa de Doctorado en Ciencias en Biosistemática, Ecología y Manejo de Recursos Naturales y Agrícolas (BEMARENA) de la Universidad de Guadalajara, al Consejo Nacional de Ciencia, Humanidades y Tecnología (CONAHCYT) por otorgar la beca académica para realizar los estudios doctorales y al Ing. Gustavo Montes Fregoso por su valioso apoyo en el trabajo de campo.

LITERATURA CITADA

- Agencia Espacial Europea. (2023). Imagen satelital Sentinel 2. Consultado el 11 de junio, 2023, desde <https://www.esa.int/>
- Areu-Rangel, O. S., Hernández-Hernández, M. Á., & Bonasia, R. (2024). Land-Use-Change-Driven Erosion and Sediment Transport in the Yaqui River Sub-Basin (Mexico): Insights from Satellite Imagery and Hydraulic Simulations. *Land*, 13(11), 1846. <https://doi.org/10.3390/land13111846>
- Carreño, I. A., Delgado, D., & Vivas, M. G. (2025). Evaluación de la vulnerabilidad del suelo por erosión hídrica en la provincia de Manabí (Ecuador) mediante la aplicación de un modelo geoespacial. *Investigaciones Geográficas*, 83, 109-128. <https://doi.org/10.14198/INGEO.27414>
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad) (2022). Ecosistemas de México, selvas secas. Consultado el 20 de marzo, 2025, desde <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/selvaSeca>
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal) (2016). Sistema Nacional de Monitoreo Forestal. Consultado el 18 de abril, 2024, desde <https://snmf.conafor.gob.mx/>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2024). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Ciudad Guzmán (1406), Estado de Jalisco. Consultado el 13 de octubre, 2024, desde <https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Edos/jalisco/jalisco.html>
- Congalton, R. G., & Green, K. (2019). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices* (3rd ed.). Boca Raton, FL, USA: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429052729>
- QGIS Project. (2023). *AcATaMa: Accuracy Assessment Tool for Thematic Maps* (versión 1.1.0). Beaverton, OR, USA: Open Source Geospatial Foundation.
- Chigbu, U. E. (2025). Connecting land tenure to climate change. *Land Use Policy*, 155, 107587. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2025.107587>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (1995). *Evaluación de los recursos forestales 1990. Países tropicales*. (Estudio FAO Montes No. 112). Roma, Italia: FAO. Consultado el 12 de octubre, 2024, desde <https://openknowledge.fao.org/items/1c843941-ba24-4bef-884b-10eb759c7a8b>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) (1996). *Forest Resources Assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes*. 130. Roma, Italia: FAO. Consultado el 12 de octubre, 2024, desde <https://www.fao.org/4/w0015e/w0015e00.htm>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) (2001). *Global Forest Resources Assessment 2000. FAO Forestry Paper 140*. Roma, Italia: FAO. Consultado el 12 de octubre, 2024, desde <https://openknowledge.fao.org/items/d011429d-9a08-4beb-a06b-a77fa9af4088>
- Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., ... & Snyder, P. K. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309(5734), 570-574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>
- Gachuz, N., Olea-Olea, S., Escolero, O., & Medina-Ortega, P. (2024). Analysis of the relationship between land use change and piezometric levels in the Basin of Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 136, 104817. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.104817>
- Galicia, L., & Rodríguez-Bustos, L. (2016). Causas locales de la transformación del paisaje en una región montana del centro de México. *Acta Universitaria*, 26(6), 83-94. <https://doi.org/10.15174/au.2016.1168>
- Ghaffari, G., Keesstra, S., Ghodousi, J., & Ahmadi, H. (2010). SWAT-simulated hydrological impact of land-use changes in the Zanjanrood basin, Northwest Iran. *Hydrological Processes: An International Journal*, 24(7), 892-903. <https://doi.org/10.1002/hyp.7530>
- Gómez-Tagle, A. F., Fuerte-Velázquez, D. J., Barajas-Alcalá, A. G., Quiroz-Rivera, F., Alarcón-Chaires, P. E., & Guerrero-García-Rojas, H. (2022). Blue and Green Water Footprint of Agro-Industrial Avocado Production in Central Mexico. *Sustainability*, 14(15), 9664. <https://doi.org/10.3390/su14159664>
- Guerrero-Morales, J., Fonseca, C. R., Gómez-Albores, M. A., Sampedro-Rosas, M. L., & Silva-Gómez, S. E. (2020). Proportional variation of potential groundwater recharge as a result of climate change and land-use: A study case in Mexico. *Land*, 9(10), 364. <https://doi.org/10.3390/land9100364>
- Hannam, J. A., Keay, C. A., Mukherjee, K., Rugg, I., Williams, A., & Cooke, J. (2025). Changes in land capability for agriculture under climate change in Wales. *Science of The Total Environment*, 987, 179790. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179790>
- Hernández-Juárez, R. A., Martínez-Rivera, L. M., Peñuela-Arévalo, L. A., & Rivera-Reyes, S. (2020). Identificación de zonas potenciales de recarga y descarga de agua subterránea en la cuenca del río Ayuquila-Armería mediante el uso de SIG y el análisis multicriterio. *Investigaciones Geográficas*, 101, 1-19. <https://doi.org/10.14350/rig.59892>
- Hosseini, M., & Ashraf, M. A. (2015). Effect of land use changes on water balance and sediment yield in Iran. *Application of the SWAT model for water components separation in Iran*, 33-61. https://doi.org/10.1007/978-4-431-55564-3_2
- Housni, F. E., Macías, A., Magaña, C. R., Bracamontes, H., & Najine, A. (2015). Cambio de uso de suelo por los invernaderos en el municipio de Zapotlán el Grande, Jalisco, México: Un análisis multitemporal. *Ingenierías*, 2(1), 40-44.
- IIEGJ (Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco). (2021a). *Zapotlán el Grande: diagnóstico del municipio*. Guadalajara, Jalisco, México: Gobierno del Estado de Jalisco.
- IIEGJ (Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco). (2021b). *Gómez Farías: diagnóstico del municipio*. Guadalajara, Jalisco, México: Gobierno del Estado de Jalisco.
- IIEGJ (Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco). (2025). *Zapotlán el Grande: Diagnóstico del municipio*. Guadalajara, Jalisco, México: IIEG.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (1997). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, Serie I (información base década de 1970), escala 1:250 000*. Aguascalientes, México: INEGI.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2001). *Uso del suelo y vegetación, Serie II (continuo nacional), escala 1:250 000. Dirección General de Geografía*. Aguascalientes, México: INEGI.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2005). *Uso del suelo y vegetación, Serie III (continuo nacional), escala 1:250 000. Dirección General de Geografía*. Aguascalientes, México: INEGI.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2009). *Uso del suelo y vegetación, Serie IV (continuo nacional), escala 1:250 000. Dirección General de Geografía*. Aguascalientes, México: INEGI.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2010). *Red hidrográfica, edición 2.0, escala 1:50 000: Subcuenca hidrográfica RH12De Laguna de Zapotlán, cuenca Lago de Chapala, región hidrológica Lerma-Santiago*. Aguascalientes, México: INEGI.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2013). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, Serie V (continuo nacional), escala 1:250 000, edición 2*. Aguascalientes, México: INEGI.

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2014). *Diccionario de datos de uso del suelo y vegetación, escala 1:250 000, versión 3*. Aguascalientes, México: INEGI.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2016). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, Serie VI (continuo nacional), escala 1:250 000, edición 1*. Aguascalientes, México: INEGI.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2019). *Cuenca hidrológica Laguna de Zapotlán: humedales*. Aguascalientes, México: INEGI.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2021). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, Serie VII (continuo nacional), escala 1:250 000, edición 1*. Aguascalientes, México: INEGI.
- Krishna-Bahadur, K. C. (2012). Spatio-temporal patterns of agricultural expansion and its effect on watershed degradation: a case from the mountains of Nepal. *Environmental Earth Sciences*, 65(7), 2063-2077. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1186-6>
- López-Pérez, J. E., & Cruz-Romero, B. (2020). Dinámica forestal y uso de suelo en las cuencas que integran al municipio Tomatlán, Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(58), 47-68. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i58.619>
- López-Vázquez, V. H., Balderas-Plata, M. A., Chávez-Mejía, M. C., Juan-Pérez, J. I., & Gutiérrez-Cedillo, J. G. (2015). Cambio de uso de suelo e implicaciones socioeconómicas en un área mazahua del altiplano mexicano. CIENCIA ergo-sum, *Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 22(2), 136-144. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/38249>
- López, E., Bocco, G., Mendoza, M., Velázquez, A., & Aguirre-Rivera, J. R. (2006). Peasant emigration and land-use change at the watershed level: A GIS-based approach in Central Mexico. *Agricultural Systems*, 90(1-3), 62-78. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2005.11.001>
- Lozano-Trejo, S., Olazo-Aquino, J., Pérez-León, M. I., Castañeda-Hidalgo, E., Díaz-Zorrilla, G. O., & Santiago-Martínez, G. M. (2020). Infiltración y escurrimiento de agua en suelos de una cuenca en el sur de México. *Terra Latinoamericana*, 38(1), 57-66. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i1.443>
- Macías, M. A., & Sevilla, G. Y. L. (2021). Naturaleza vulnerada. Cuatro décadas de agricultura industrializada de frutas y hortalizas en el sur de Jalisco, México (1980-2020). *Entre Diversidades. Revista de ciencias sociales y humanidades*, 8(1), 64-91. <https://doi.org/10.31644/ed.v8.n1.2021.a03>
- Megía-Vera, H. J., Peralta-Carreta, C., Medrano-Pérez, O., Palomeque-De la Cruz, M. A., Ramos-Reyes, R., & Galindo-Alcantara, A. (2025). Análisis de la cobertura y uso de suelo de la cuenca baja del Río Usumacinta mediante técnicas de teledetección. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-15. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2075>
- Meli, P., Ellison, D., Ferraz, S. F. D. B., Filoso, S., & Brancalion, P. H. (2024). On the unique value of forests for water: Hydrologic impacts of forest disturbances, conversion, and restoration. *Global Change Biology*, 30(2), e17162. <https://doi.org/10.1111/gcb.17162>
- Mellado, D. E. G., Mello, C. R. D., & Curi, N. (2021). Environmental degradation risk by water erosion in a water producer Colombian Andes basin. *Ciência e Agrotecnologia*, 45, e010021. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202145010021>
- Mendoza, M. E., Granados, E. L., Geneletti, D., Pérez-Salicrup, D. R., & Salinas, V. (2011). Analysing land cover and land use change processes at watershed level: a multitemporal study in the Lake Cuitzeo Watershed, Mexico (1975-2003). *Applied Geography*, 31(1), 237-250. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.05.010>
- Mewded, M., Abebe, A., Tilahun, S., & Agide, Z. (2021). Impact of land use and land cover change on the magnitude of surface runoff in the endorheic Hayk Lake basin, Ethiopia. *SN Applied Sciences*, 3, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04725-y>
- Muñoz-Villers, L. E., & López-Blanco, J. (2010). Land use/cover changes using Landsat TM/ETM images in a tropical and biodiverse mountainous area of central-eastern Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, 29(1), 71-93. <https://doi.org/10.1080/01431160701280967>
- Ochoa-Noriega, C., Velasco-Muñoz, J. F., Aznar-Sánchez, J. A., & López-Felices, B. (2022). Analysis of the acceptance of sustainable practices in water management for the intensive agriculture of the Costa de Hermosillo (Mexico). *Agronomy*, 12(1), 154. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010154>
- Palacio, J. L., Velázquez, A., Mas, J. F., Gallegos, J. D., Saucedo, R. M., Alcántara, P. C., ... & Ezcurra, E. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta ecológica*, (62), 21-37.
- Palomeque-de la Cruz, M. Á., Ruíz-Acosta, S. de C., Núñez-Magaña, T. G., Ramos-Reyes, R., Galindo-Alcántara, A., & Magaña-Alejandro, M. A. (2025). Modelación y proyección del cambio de uso del suelo en Tenosique, Tabasco, México. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-14. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.1821>
- Pérez-Vega, A., Regil-García, H. H., & Mas, J. F. (2020). Degradación ambiental por procesos de cambios de uso y cubierta del suelo desde una perspectiva espacial en el estado de Guanajuato, México. *Investigaciones Geográficas*, 103, 1-20. <https://doi.org/10.14350/ig.60150>
- Pineda-Jaimes, N. B., Bosque-Sendra, J., Gómez-Delgado, M., & Plata-Rocha, W. (2009). Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes: Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas*, 69, 33-52.
- Ramos-Reyes, R., Palomeque-De la Cruz, M. Á., Megía-Vera, H. J., & Landeros-Pascual, D. (2021). Modelo del cambio de uso de suelo en el sistema lagunar Carmen-Pajonal-Machona, México. *Terra Latinoamericana*, 39, 1-13. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.587>
- Romero, J., Ávila, J. A., Cortés, V. H. S., & Diakite, L. D. (2022). Transiciones del cambio de uso de suelo en el estado de Puebla (1980-2016), México. *Investigaciones Geográficas*, 109, 1-17. <https://doi.org/10.14350/ig.60621>
- Ruiz-García, V. H., Asensio-Grima, C., Ramírez-García, A. G., & Monterroso-Rivas, A. I. (2023). The hydrological balance in micro-watersheds is affected by climate change and land use changes. *Applied Sciences*, 13(4), 2503. <https://doi.org/10.3390/app13042503>
- SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural) (2020). *Agricultura protegida, otra manera de cultivar*. Consultado el 20 de mayo, 2024, desde <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/agricultura-prottegida-otra-manera-de-cultivar>
- Servicio de Información sobre Sitios Ramsar (2024). *Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR)*. Convención Ramsar sobre los Humedales. Consultado el 12 de mayo, 2024, desde <https://rsis.ramsar.org/es/rsi/1466>
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2018). *Informe del medio ambiente: Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales* (Capítulo 2). Consultado el 23 de enero, 2025, desde <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap2.html#tema1Sistema>
- SIAP (Sistema de Información Agropecuaria y Pesquera) (2023). Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Cierre de la producción agrícola. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Consultado el 20 de febrero, 2025, desde <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- SNIEG (Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica). (2023). *Informe del medio ambiente: Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales* (Capítulo 2). Consultado el 18 de marzo, 2025, desde https://www.snieg.mx/Documentos/Normatividad/Vigente/cat_tem_gen_tipos_veg_oct2016.pdf
- Ware, H. H., Chang, S. W., Lee, J. E., & Chung, I. M. (2024). Assessment of hydrological responses to land use and land cover changes in forest-dominated watershed using SWAT model. *Water*, 16(4), 528. <https://doi.org/10.3390/w16040528>
- Wine, M. L. (2024). Irrigation water use driving desiccation of Earth's endorheic lakes and seas. *Australasian Journal of Water Resources*, 28(1), 74-85. <https://doi.org/10.1080/13241583.2022.2141333>