

Análisis multitemporal de cambio de uso de suelo. Su aplicación en un municipio rural de Veracruz, México

Luis Rojas Pérez¹, Juan Guillermo Cruz Castillo²,
Alejandro Monterroso Rivas³, Ismael Quiroz Guerrero⁴,
Pablo Torres Lima^{5*}

Resumen. Existen diversos procesos de cambio de uso de suelo (CUS) con diferentes niveles de impacto ambiental en México. El uso de modelos geomáticos, mediante el uso de imágenes de satélite gratuitas, puede ayudar a tomar decisiones acerca de la conservación de los recursos naturales. Este trabajo tiene como objetivo evaluar el CUS municipal, empleando un análisis multitemporal de la cobertura forestal en Huatusco, Veracruz, una región con alta diversidad de uso de suelo, con énfasis en la producción de café (*Coffea arabica* L.). Se utilizaron dos imágenes satelitales Planet, que tuvieron una clasificación supervisada Support Vector Machine. Se obtuvo como principales resultados que en 2017-2021 de las 20,294 ha totales, 11,074 ha permanecieron estables, mientras que 9,220 ha expresaron cambios. Las tasas de cambio en bosque mesófilo y pastizales mostraron una reducción anual de -10.9% y -4.5%. El área urbana, el uso predominante agrícola, la vegetación secundaria, los cuerpos de agua y las plantaciones perennes incrementaron entre 6 y 13.6%. En la validación de cartografía, el coeficiente Kappa para 2017 fue de 0.83 y el de 2021, 0.77. En la proyección a futuro 2021-2050, la categoría urbano y desarrollado, el uso predominante agrícola, y los cuerpos de agua tendrán incrementos de 4.9%. La vegetación secundaria se mantiene, y el bosque mesófilo -2.4%, y las plantaciones perennes -1.6% y los pastizales -0.7%. Se concluye que para la planeación territorial, principalmente agrícola y forestal, así como para la conservación de recursos naturales en los municipios de México, la aplicación de la metodología utilizada puede ser útil.

Palabras clave: Impacto ambiental; clasificación supervisada; predicción de cambio; matriz de confusión; recursos naturales.

Abstract. There are various land use change (LUC) processes with different levels of environmental impact in Mexico. The use of geomatics models, using free satellite images, can help in making decisions about natural resource conservation. This study aims to evaluate municipal CUS using a

¹ Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. ORCID: 0000-0001-5189-8736.

² Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. ORCID: 0000-0001-8687-6235.

³ Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. ORCID: 0000-0003-4348-8918.

⁴ Univesidad Veracruzana. Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Peñuela, Veracruz, México. ORCID: 0000-0003-4687-3221.

⁵ Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco, CDMX, México. ORCID: 0000-0001-5253-8580.

* Autor de contacto. Correo electrónico: ptorres@correo.xoc.uam.mx

multitemporal analysis of forest cover in Huatusco, Veracruz, a region with highly diverse land use, and with an emphasis on coffee production (Coffea arabica L.). Two Planet satellite images were used, which underwent supervised Support Vector Machine classification. The main results obtained were that in 2017-2021, of the total 20,294 ha, 11,074 ha remained stable, while 9,220 ha showed changes. The rates of change in mesophilic forest and grasslands showed an annual reduction of -10.9% and -4.5%. Urban and developed areas, predominant agricultural use, secondary vegetation, water bodies, and perennial plantations increased between 6% and 13.6%. In the mapping validation, the Kappa coefficient for 2017 was 0.83 and for 2021, 0.77. In the 2021-2050 future projection, the urban area, predominant agricultural use, and water bodies will increase by 4.9%. Secondary vegetation remains, with mesophilic forest accounting for 2.4%, perennial plantations for 1.6%, and grasslands for 0.7%. It is concluded that the methodology used may be useful for land-use planning, mainly agricultural and forestry, as well as for the conservation of natural resources in Mexican municipalities.

Keywords: *Environmental impact; supervised classification; change prediction; confusion matrix; natural resources.*

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas el planeta ha sufrido un acelerado proceso de cambios de uso del suelo (CUS), debido principalmente a la constante expansión urbana y el establecimiento de nuevas zonas agrícolas (Grimm et al., 2008). Las transformaciones humanas de los sistemas naturales y la explotación de los recursos naturales han provocado que algunos ecosistemas, y muchas especies se encuentren amenazadas (Flores-Tecalco et al., 2025). Esto ha im-

pactado de forma negativa la cubierta forestal mundial (Keenan et al., 2015).

Los historiadores ambientales y los ecologistas han reconstruido representaciones del cambio del paisaje en todo el mundo. Estos estudios no han cubierto la totalidad del planeta y no se han ensamblado para obtener una imagen global. Sin embargo, con la teledetección se ha obtenido la imagen global de los paisajes del mundo, además de la generación de escenarios futuros para un mejor entendimiento de cambios en el paisaje. Así, las predicciones pueden ser utilizadas como un sistema de alerta temprana que manifiesta los efectos de posibles cambios de usos del suelo que son prioritarios para un análisis ambiental o la intervención política mediante la toma de decisiones agroambientales (Lambin & Geist, 2006).

En México, las tasas de deforestación fueron en promedio de 0.5% (354,000 ha/año) en 1990–2000, y de 0.2% (155,000 ha/año) en 2005–2010 (FAO, 2010). Para muchas regiones de México, no se ha usado información espacial y temporal útil para cuantificar con precisión los CUS, ni en particular la deforestación. Es importante contar con cartografía de uso del suelo, reciente y precisa para la toma de decisiones sobre el manejo de los bosques, y el desarrollo de una agricultura amigable con el ambiente (Mas et al., 2017).

En virtud de que los paisajes rurales son portadores de una multitud de servicios ecosistémicos regionales, características y procesos de uso del suelo, y transformaciones socio-espaciales y temporales dinámicas, el estudio de sus componentes, características y magnitud del cambio, por ejemplo en la agricultura debe estar relacionado con la influencia de los sistemas agrícolas en el propio paisaje regional (Torres-Lima & Madrigal-Gómez, 2025). De esta forma, el análisis de los cambios de cobertura, y uso del suelo en cualquier territorio conlleva a comprender como interactúan factores socioeconómicos y biofísicos

(Pineda-Jaimes et al., 2011). Los estudios de cambio de uso de suelo y vegetación son el referente para conocer las trayectorias de procesos de cambio económico que existen en determinado territorio (Mas & Flamenco-Sandoval, 2011; Camacho-Sanabria et al., 2017).

El cambio de uso de suelo hacia monocultivos provoca pérdida de cobertura vegetal, contaminación del agua por uso indiscriminado e intensivo de agroquímicos y degradación del suelo por erosión (Gordillo-Ruiz & Castillo-Santiago, 2016). Una de las causas de ampliación de la frontera agrícola es la adaptación de los productores a las condiciones económicas, sociales y tecnológicas imperantes, con una tendencia clara a la reconversión productiva de cultivos no competitivos a competitivos. Otra causa es la implementación de las políticas globales; que dictan las tendencias de consumo y producción mundial de alimentos (Cruz-Delgado et al., 2013), y cuando se ha sobrepasado la frontera agrícola, se inicia la incursión hacia la frontera forestal (IICA, 2020).

El municipio de Huatusco, Veracruz, como modelo, tiene una superficie de bosque mesófilo de montaña (BMM), en estado virgen y vegetación secundaria del mismo; esta, se ha logrado mantener y regenerar en los últimos treinta años, no obstante, esto representa un importante desafío para la conservación de especies animales y vegetales por efectos del cambio de uso de suelo y la fragmentación del bosque (Partida-Sedas et al., 2017). En los últimos años Huatusco, al igual que otros municipios de México, ha tenido cambios de uso de suelo y se desconoce cómo esto ha influido en la pérdida de cobertura forestal. El análisis multitemporal del cambio de uso de suelo no ha sido ampliamente usado en México en comparación con países de Latinoamérica (Florez-Yepes et al., 2017; Montilla-Pacheco et al., 2017; Duval, 2017). El objetivo del presente trabajo fue evaluar el cambio de uso de suelo en el municipio de Huatusco durante 2017-2021, con el fin de mostrarlo como

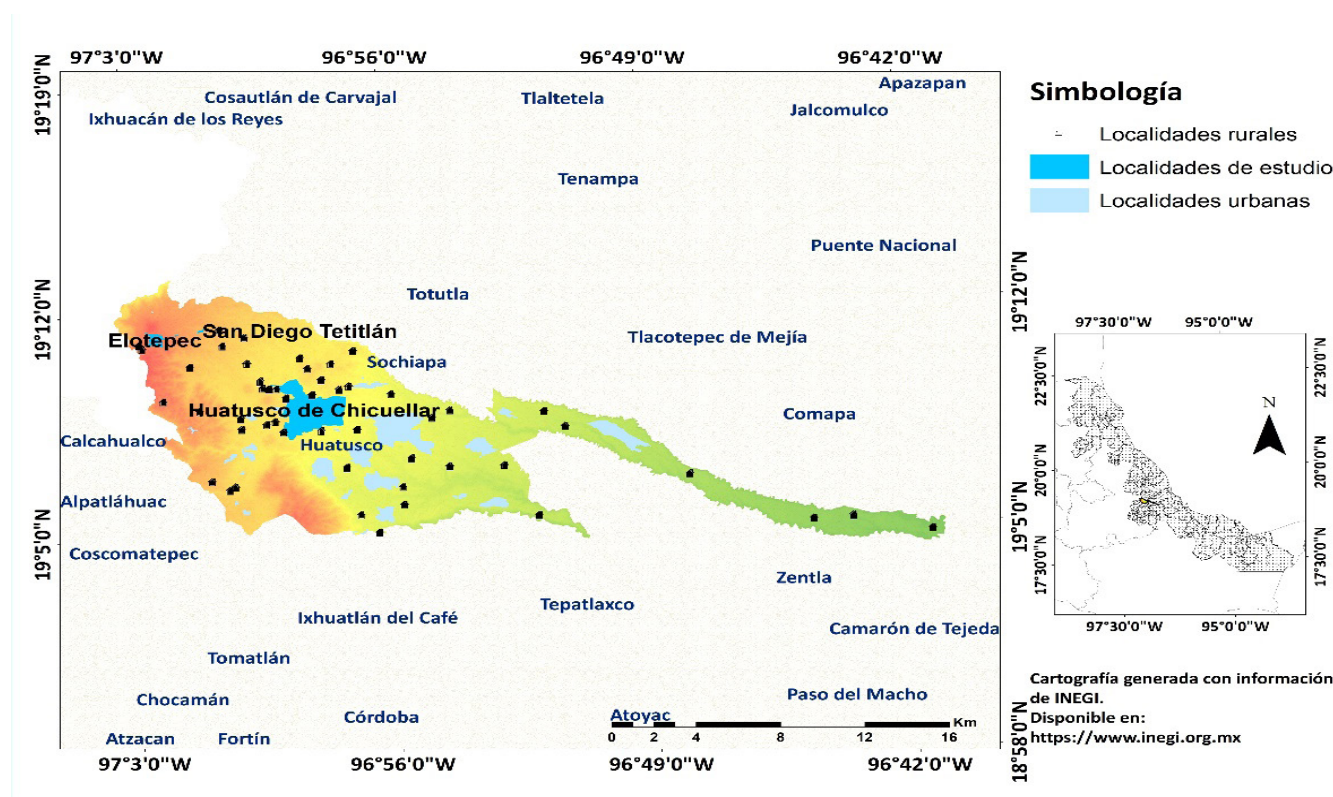
modelo a ser utilizado en otros municipios en México para conservar recursos naturales, y posibilitar el desarrollo de una agricultura amigable con el ambiente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

El municipio de Huatusco de Chicuellar (Huatusco), Veracruz, está ubicado en las provincias fisiográficas Sierra Volcánica Transversal y Llanura Costera del Golfo Sur (Figura 1). El conjunto de datos vectoriales Geológicos (INEGI, 2019), indica que las clases de roca más representativas son: ígneas extrusivas básicas (78%), calizas (18%) y Arenisca-Conglomerado (4%). Los suelos dominantes en la zona de estudio son: Andosols (46%), Luvisols (41%), Leptosols (10%) y Cambisols (3%). Se distinguen dos tipos de clima: cálido subhúmedo en la parte baja de 400 a 800 msnm (Aw1 y Aw2) y Semicálido húmedo ((A)C(m) y (A)C(fm)) en la parte alta de 800 a 2,000 msnm. Su microcuenca es el río Capula. El municipio de Huatusco tiene 22,223 ha, y los usos más importantes del suelo son la agricultura de temporal semipermanente y permanente, como chayote y caña de azúcar (6,177 ha), pastizal cultivado (5,295 ha), agricultura de temporal permanente, tal es el caso de aguacate, café y macadamia (3,338 ha), vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña (2,538 ha) y bosque mesófilo de montaña (1,517 ha) (INEGI, 2019). Los primeros derivan de la remoción de los segundos y cuentan con la intrusión de especies de zonas de uso agropecuario y recreativo (López-Pérez et al., 2011).

Figura 1. Área de estudio. Municipio de Huatusco, Veracruz



Fuente: Elaboración original.

Procesamiento inicial de imágenes y obtención de cartografía base

Se obtuvieron dos imágenes satelitales Planet de una estación similar (16/07/2017 y 12/07/2021), con las cuales se generó cartografía sobre el uso de suelo y vegetación para cada uno de ellos en el municipio de Huatusco, Veracruz.

Para la obtención de las imágenes se empleó la plataforma Planet Explorer (Planet Team, 2021) con una resolución de 3x3 m. Además de las imágenes mencionadas, se

utilizó el marco geoestadístico del INEGI (INEGI, 2019). A las imágenes satelitales se les realizó una combinación de bandas y se generó una composición infrarroja (Bandas 4-3-2). La vegetación fue de tonalidad roja, debido a la alta reflectividad en el infrarrojo (Chuvienco, 2002). Las imágenes de satélite se procesaron mediante clasificación supervisada con base en la aplicación del algoritmo Support Vector Machine (Fragou et al., 2020). Se asignaron siete categorías de análisis, las cuales fueron: urbano y desarrollado, uso predominante agrícola, plantaciones perennes, pastizal, bosque mesófilo, vegetación secundaria y agua.

Análisis del cambio de uso del suelo

El análisis multitemporal se realizó con el software ArcGIS PRO. Se analizaron dos pares de mapas mediante una matriz de tabulación cruzada en el que las categorías de usos del suelo del tiempo 1 estuvieron representadas en las filas, y las categorías de usos del suelo del tiempo 2, en las columnas. Así, se puede ver la cantidad que cambia de una categoría a otra y la persistencia, mostrada en la diagonal (Pontius et al., 2004).

Tasas de cambio

Las tasas de cambio se determinaron a partir de la ecuación (FAO, 1996):

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

Donde t es la tasa de cambio; S_1 es la superficie cubierta por un tipo dado de uso/cobertura del suelo en la fecha 1; S_2 es la superficie del mismo uso/cubertura del suelo en la fecha 2 y; n es el número de años transcurridos entre las dos fechas. Para expresar en % se multiplicó por 100.

Validación de la cartografía

Los puntos de muestreo utilizados como regiones de interés fueron asignados por conocimiento previo de las categorías de análisis del área de estudio. El método utilizado para validar la cartografía fue una matriz de confusión en

con ArcGIS PRO, la cual es una matriz bidimensional, en donde generalmente las filas representan las clases de referencia (verdad terreno) y las columnas las categorías del mapa (verdad imagen), deducidas de la interpretación de imágenes de satélite (Sánchez-Muñoz, 2016). La diagonal de la matriz expresó el número de puntos de verificación para los cuales existió una correspondencia entre las categorías del mapa clasificado y los datos de referencia, mientras los marginales indicaron errores de asignación (Mas, Díaz-Gallegos, & Pérez-Vega, 2003). Con esta matriz se obtuvo el coeficiente Kappa para cada uno de los mapas, el cual es una medida de precisión que oscila entre 0 (totalmente impreciso) y 1 (completamente exacto) y mide la concordancia observada entre la clasificación y los datos de referencia y el acuerdo que podría lograrse únicamente mediante coincidencias aleatorias (Lesschen et al., 2005).

Modelo de cambios de usos de suelo

Con la herramienta Land Change Modeler del software Terrset se analizaron los cambios en la cobertura de suelo, se modelaron empíricamente las relaciones con las variables explicativas (distancia a carreteras, distancia a zonas urbanas, altitud y pendiente) y se simulaban escenarios futuros de CUS para 2030, 2040 y 2050 (Singh et al., 2022). También, se realizó un análisis sobre la tenencia de la tierra, cercanía a zonas urbanas y grupos de suelos para conocer su probable influencia en el cambio de uso de suelo del municipio en 2017-2021.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

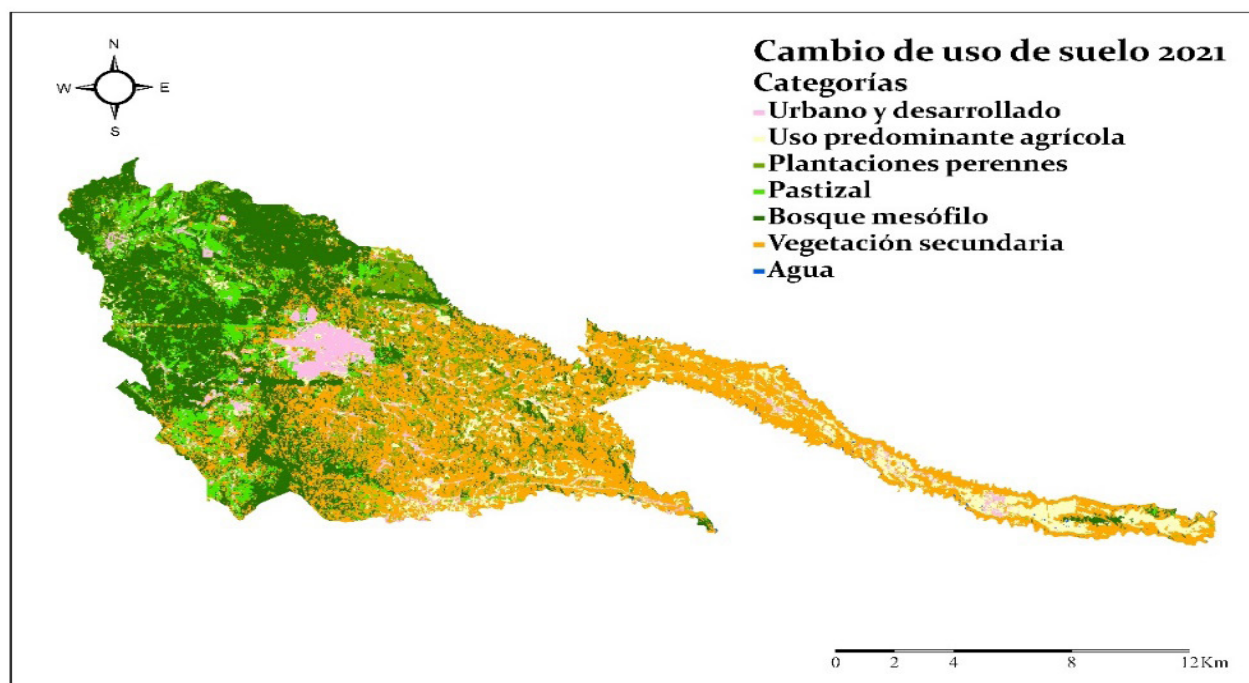
Cartografía de uso de suelo y vegetación para los años 2017 y 2021

Al comparar el año 2017 (Figura 2) con el de 2021 (Figura 3) el área de bosque mesófilo se deforestó y aumentaron las áreas destinadas al uso predominante agrícola,

urbano y desarrollado, y las plantaciones perennes. En el año 1985 existían 2,135 ha de vegetación primaria de bosque mesófilo de montaña (BMM) y 1649 ha de vegetación secundaria, mientras que, en el 2013, la vegetación primaria abarcó 2,036 ha y la secundaria 1,374 ha (Partida et al., 2017).

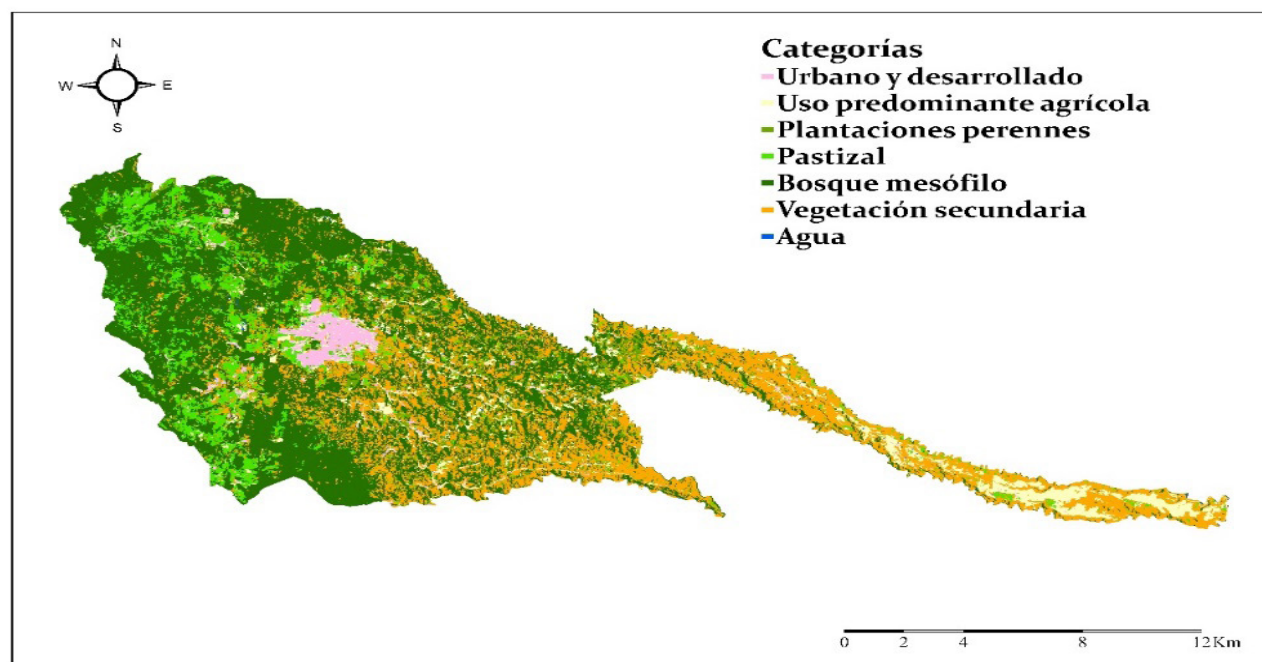
El BMM está limitado a la región montañosa del municipio (1200-1800 msnm), esta condición fisiográfica ha condicionado el avance de los agroecosistemas, sin embargo, esto no ha evitado que se continúe con la deforestación para plantar principalmente aguacate ‘Hass’ (*Persea americana* Mill.) y cafetos (*Coffea arabica*).

Figura 2. Uso de suelo y vegetación de Huatusco, Veracruz en el año 2017



Fuente: Elaboración original.

Figura 3. Uso de suelo y vegetación de Huatusco, Veracruz en el año 2021



Fuente: Elaboración original.

Persistencias, pérdidas y ganancias y tasas de cambio en el período 2017-2021

En el período de 2017 a 2021, de las 20,294 ha en total 11,074 ha (55%) de la superficie total permanecieron estables, mientras que 9,220 ha (45%) expresaron cambios en la cobertura y uso del suelo (Cuadro 1). El área con bosque mesófilo registró pérdidas de 4,737 ha (23.4%) y respecto con las ganancias de cobertura, las categorías urbano y desarrollado, uso predominante agrícola, plantaciones perennes y cuerpos de agua registraron ganancias de 449.8 ha (2%), 1,207.5 ha (6%), 1,552.7 ha (8%) y 22.3 ha (0.1%) respectivamente. Casos de pérdidas de superfi-

cie arbórea existen también en Sinaloa, México, donde la selva perdió 2,374.19 km² y, por el contrario, la agricultura de temporal se extendió en 3326.62 km² y la categoría de asentamientos humanos pasó de tener 191.51 km² a 623.28 km² (Monjardín-Armenta et al., 2017). En otro estudio, en la cuenca del río Sabinal, Chiapas, México, durante 1992-2002 el 72% del territorio de la cuenca conservó su mismo tipo de cobertura de suelo, mientras que 28% tuvo algún tipo de cambio, y los bosques tuvieron un decremento de 663 ha (8.7%). También, la vegetación secundaria disminuyó 177 ha (1.5%), sin embargo, los mayores cambios ocurrieron en asentamientos humanos, los cuales se expandieron a 4,331 ha (63%) y el área de cultivos disminuyó en 3,538 ha (24.2%) (Gordillo-Ruiz & Castillo-Santiago, 2016).

Cuadro 1. Persistencias, pérdidas, ganancias, y tasas anuales de cambio en el período 2017-2021

	Usos de suelo							Superficie
	Urbano y desarrollado	Uso predominante agrícola	Pastizal	Bosque mesófilo	Vegetación secundaria	Agua	Plantaciones perennes	Total ha/%
Área 2017 (ha)	575	1280	2055	9516	5416	18	1435	20294
%	2.8	6.3	10.1	46.9	26.7	0.1	7.1	100
Área 2021 (ha)	959	1905	1709	5994	7890	25	1813	20294
%	4.7	9.4	8.4	29.5	38.9	0.1	8.9	100
Persistencia	509	697	1070	4779	3756	3	260	11074
%	2.5	3.4	5.3	23.6	18.5	0.0	1.3	55
Pérdidas	66	583	985	4737	1660	15	1175	9220
%	0.3	2.9	4.9	23.4	8.2	0.1	5.8	45
Ganancias	449.8	1207.5	638.5	1215.6	4134.0	22.3	1552.7	9220
%	2	6	3	6	20	0	8	45
Tasas de cambio %	13.6	10.4	-4.5	-10.9	9.9	9.4	6	

Fuente: Elaboración original.

Las tasas de cambio por categoría (Cuadro 1) mostraron en 4 años que el bosque mesófilo y los pastizales tuvieron un proceso de reducción anual de -10.9% y -4.5%. Por otra parte, existió un proceso de expansión del área urbana y desarrollada, el uso predominante agrícola, los cuerpos de agua y las plantaciones perennes con 13.6%, 10.4%, 9.4% y 6% respectivamente. En la cuenca del río Metztlán, (Hidalgo, Veracruz y Puebla) existió una tasa positiva de 2.3% para la superficie leñosa (1.42%)

(Reynoso-Santos et al., 2016). En Comalcalco, Tabasco, México, el uso agrícola presentó una tasa de crecimiento de 1%, mientras que el pastizal 0.9% a diferencia del área urbana que alcanzó 6.1% durante 10 años (Ramos-Reyes & Palomeque-de la Cruz, 2017) Tabasco, México. En general, en México, existen tasas negativas para bosques y selvas y aumentos en desarrollos urbanos (Sahagún-Sánchez & Reyes-Hernández, 2018).

Validación de la cartografía

En 2017 todas las categorías de análisis tuvieron alta correspondencia, a excepción del uso predominante agrícola con el 61% y es debido a que en algunas partes de la imagen se confunde con plantaciones perennes y vegetación secundaria (Cuadro 2). El coeficiente Kappa general (0.83) tuvo muy buena concordancia.

En el 2021, todas las categorías mostraron alto porcentaje de correspondencia a excepción de la vegetación secundaria que tiene 77%, la cual se confunde con bosque mesófilo y plantaciones perennes (Cuadro 3). El coeficiente Kappa es de 0.77% y es de buena concordancia.

Cuadro 2. Matriz de confusión del año 2017

Categorías	Urbano y desarrollado	Uso predominante agrícola	Pastizal	Bosque mesófilo	Vegetación secundaria	Agua	Plantaciones perennes	Total	U_Accuracy	Kappa
Urbano y desarrollado	30	2	1	0	0	0	0	33	0.91	0
Uso predominante agrícola	1	43	1	0	0	0	1	46	0.93	0
Pastizal	0	2	32	1	2	0	0	37	0.86	0
Bosque mesófilo	0	0	0	344	0	0	0	344	1.00	0
Vegetación secundaria	0	8	0	9	8	0	0	25	0.32	0
Agua	0	1	0	0	0	10	0	11	0.91	0
Plantaciones perennes	0	14	0	5	0	0	9	28	0.32	0
Total	31	70	34	359	10	10	10	524	0.00	0
P_Accuracy	0.97	0.61	0.94	0.96	0.80	1.00	0.90	0.00	0.91	0
Kappa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.83

Fuente: Elaboración original.

Cuadro 3. Matriz de confusión del año 2021

Categorías	Urbano y desarrollado	Uso predominante agrícola	Pastizal	Bosque mesófilo	Vegetación secundaria	Agua	Plantaciones perennes	Total	U_Accuracy	Kappa
Urbano y desarrollado	34	1	0	0	1	0	0	36	0.94	0
Uso predominante agrícola	0	25	0	0	0	0	0	25	1.00	0
Pastizal	0	2	20	3	3	0	0	28	0.71	0
Bosque mesófilo	0	0	0	266	11	0	1	278	0.96	0
Vegetación secundaria	2	0	0	31	75	0	0	108	0.69	0
Agua	0	0	0	0	0	10	0	10	1.00	0
Plantaciones perennes	0	1	0	10	8	0	9	28	0.32	0
Total	36	29	20	310	98	10	10	513	0.00	0
P_Accuracy	0.94	0.86	1.00	0.86	0.77	1.00	0.90	0.00	0.86	0
Kappa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.77

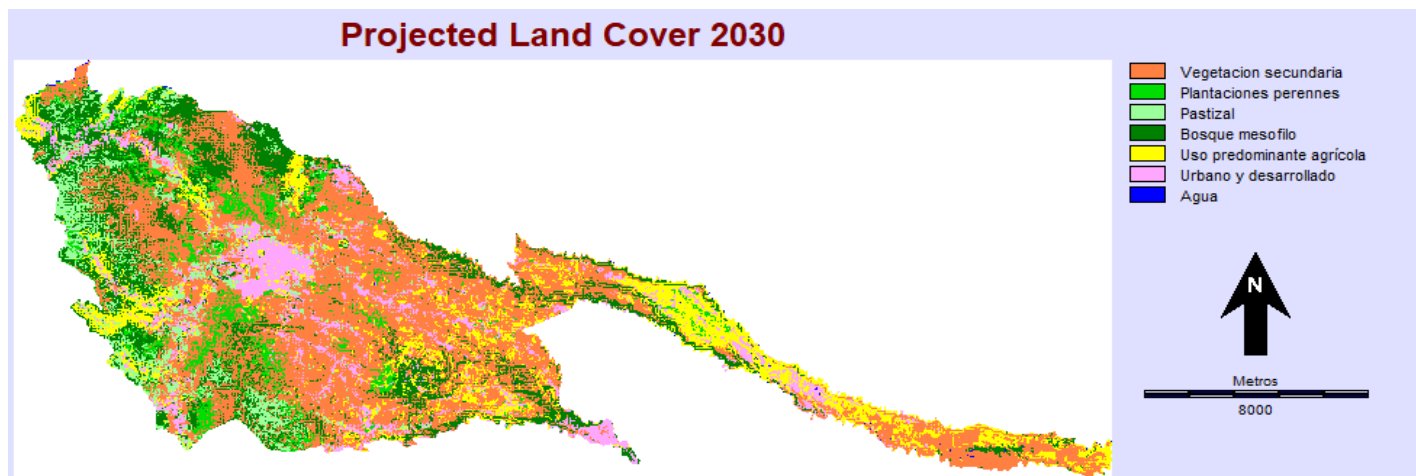
Fuente: Elaboración original.

En una zona de transición de montaña en el estado de México, el 93% de la superficie de bosque representada en el mapa correspondió a esta categoría, y 7% restante perteneció al sector agropecuario. Asimismo, el 13.3% de la superficie cartografiada como agropecuario correspondió a bosque (Camacho-Sanabria et al., 2015).

Modelo de cambios de usos de suelo

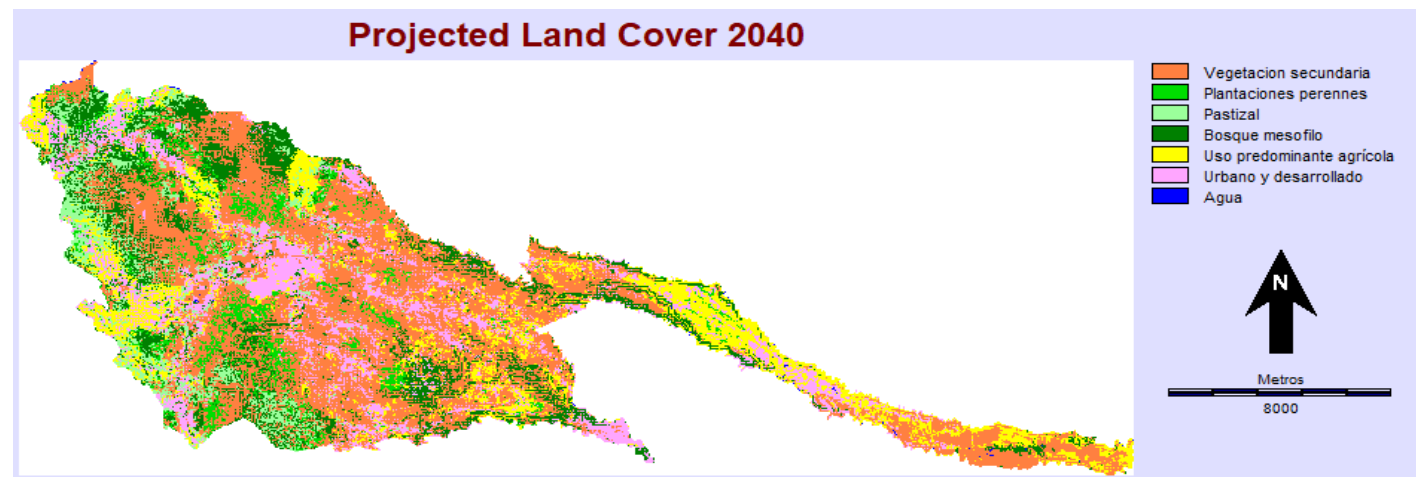
Con los mapas de uso de suelo para los años 2017 y 2021 se obtuvieron tres diferentes escenarios a futuro con el modelador de cambio de uso de suelo de Terrset, los cuales corresponden al año 2030, 2040, 2050 (Figuras 4, 5 y 6). La categoría urbano y desarrollado, en donde se engloban zonas urbanas, carreteras, invernaderos, bodegas, entre otros para el 2050 es 4 veces mayor que en 2021. Caso contrario sucede con el bosque mesofilo que tendrá una reducción del 50% respecto a la superficie del año 2021.

Figura 4. Uso de suelo y vegetación de Huatusco, Veracruz para el año 2030



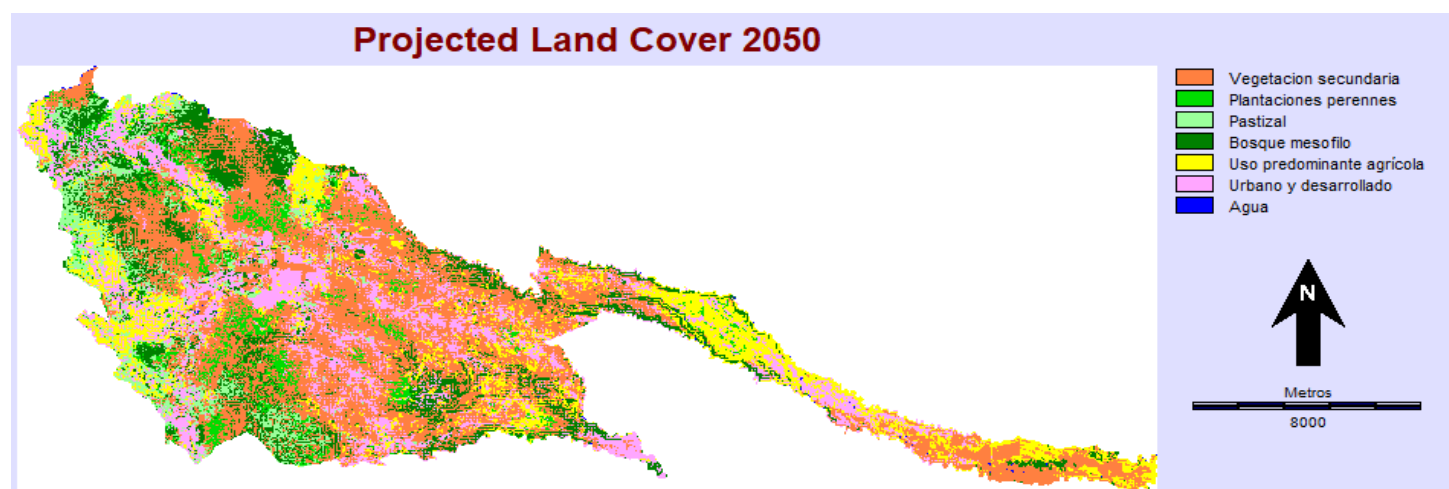
Fuente: Elaboración original.

Figura 5. Uso de suelo y vegetación de Huatusco, Veracruz para el año 2040



Fuente: Elaboración original.

Figura 6. Uso de suelo y vegetación de Huatusco, Veracruz para el año 2050



Fuente: Elaboración original.

En el Cuadro 4 se muestra la superficie, porcentaje y tasa cambio de uso de suelo durante el período 2021-2050 en donde podemos observar que la categoría urbano y desarrollado tendrá un incremento de 4.9%, lo cual significa que pasaría de 959 ha en 2,021 a 3,879 ha para el año 2050; otra categoría con crecimiento positivo es el uso predominante agrícola, esta va de 1,905 ha en 2021 a 3,046 ha en 2050 con una tasa de cambio de 1.6%. Por último, en cuanto a incremento de la tasa de cambio se observan los cuerpos de agua con un 0.5% y estos pueden pasar de 25 ha en 2021 a 29 ha en 2050.

Este crecimiento acelerado también se encontró en la ciudad de Melbourne, Australia en el periodo 2014-2030, en terrenos residenciales e industriales con una tasa de 26.13% y en tierras cultivadas con 6.99% (Rahnama, 2021). En Riad, Arabia Saudita, estimaron un crecimiento de la zona urbana de 38.2 % para el espacio de tiempo

entre 2017-2047 (Altuwaijri et al., 2019). En el presente estudio, existió una categoría que se mantuvo neutral entre 2021-2050 y fue la vegetación secundaria. En la Zona Costera: Cuauhtemotzin-El Pailebot, Tabasco, en una proyección de 2018 a 2030 encontraron una tasa de -0.9% en la cobertura arbórea (Ramos-Reyes et al., 2019).

Dentro de las categorías con tasa de cambio negativa se encuentra el bosque mesófilo con -2.4% puesto que en 2021 existen 5,994 ha y en el año 2050 pasaría a 2,929 ha. Otra de las categorías con tasa de cambio negativa (-1.6%) son las plantaciones perennes, donde se agrupan sistemas agroforestales de café, plantaciones de aguacate y caña con una superficie de 1813 ha en 2021 y 1122 ha en 2050. Y finalmente los pastizales tendrán una reducción de -0.7% pasando de 1,709 ha en 2021 a 1,400 ha en 2050 (Cuadro 4).

Cuadro 4. Superficie, porcentaje y tasa cambio de uso de suelo 2021-2050 en Huatusco, Veracruz

Categoría	2021 (ha)	%	2030 (ha)	%	2040 (ha)	%	2050 (ha)	%	Tasa de cambio (%)
Urbano y desarrollado	959	4.7	2023	10.0	3089	15.2	3879	19.1	4.9
Uso predominante agrícola	1905	9.4	2847	14.0	3040	15.0	3046	15.0	1.6
Pastizal	1709	8.4	1477	7.3	1422	7.0	1400	6.9	-0.7
Bosque mesófilo	5994	29.5	3690	18.2	3166	15.6	2929	14.4	-2.4
Vegetación secundaria	7890	38.9	8875	43.7	8351	41.1	7890	38.9	0.0
Agua	25	0.1	26	0.1	27	0.1	29	0.1	0.5
Plantaciones perennes	1813	8.9	1357	6.7	1200	5.9	1122	5.5	-1.6
Total	20295	100	20294	100	20294	100	20294	100	

Fuente: Elaboración original.

En Nashe, Etiopía entre 2019-2050 estimaron en tierras forestales una tasa de cambio de -52.3%, en pastizales de -65.7% y en tierras de pastoreo de -21.1% mientras que las tierras agrícolas tienen un crecimiento de 20% (Leta et al., 2021). En la cuenca del río Manipur, India, existieron tendencias similares con una reducción del bosque de 1.4% y un incremento de la superficie construida de 20.99%, y los cuerpos de agua se incrementaron en un 16.4%, y la agricultura en 3.06% (Anand & Oinam, 2020).

Los escenarios a futuro de cambio de uso de suelo generan una perspectiva sobre posibles impactos ambientales causados en el territorio, y permiten establecer una regulación en el desarrollo de las actividades

antropogénicas. Con la integración de los modelos geomáticos del cambio de uso del suelo puede existir una planeación a corto y mediano plazo en el establecimiento de programas de ordenamiento territorial, que disminuyan impactos negativos en el territorio (Ramos-Reyes et al., 2021).

Cercanía a zonas urbanas

Como se aprecia en las figuras de cambio de uso de suelo para ambos años (2017 y 2021) las áreas que se encuentran cercanas a las zonas urbanas son más propicias a

presentar cambios en el uso del suelo que aquellas más alejadas como es el caso de la parte oeste y norte donde podemos observar el bosque mesófilo de montaña. El crecimiento de la población generalmente conlleva a una sobreexplotación de los recursos y una demanda mayor de servicios. Dos cambios significativos del suelo son de agrícola y pastizal a asentamientos humanos (Pineda-Jaimes et al., 2009; López-Vazquez et al., 2015).

CONCLUSIONES

En Huatusco, Veracruz durante el periodo 2017-2021 el paisaje ha sido modificado debido al cambio de uso de suelo, el 55% de la superficie ha permanecido estable, mientras que el 45% expresó cambios en la cobertura y uso del suelo. El área con bosque mesófilo y el pastizal tienen una tasa anual negativa en tanto otras indican un proceso de crecimiento, como es la categoría urbano y desarrollado, uso predominante agrícola, vegetación secundaria, plantaciones perennes y cuerpos de agua.

En el año 2050 la categoría urbano y desarrollado, el uso predominante agrícola y los cuerpos de agua tendrán un incremento en la superficie, la vegetación secundaria se mantendrá igual, mientras que el bosque mesófilo, las plantaciones perennes y los pastizales disminuirán en superficie.

Estudios de esta índole, pueden ser útiles a municipios de México para llevar a cabo una planeación territorial y la conservación de recursos naturales estratégicos utilizando las imágenes satelitales gratuitas disponibles.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada a LRP para sus estudios de Doctorado, y a Planet Team por la licencia otorgada.

BIBLIOGRAFÍA

- Altuwajiri, H. A., Alotaibi, M. H., Almudlaj, A. M., & Almalki, F. M. (2019). Predicting urban growth of Arriyadh city, capital of the Kingdom of Saudi Arabia, using Markov cellular automata in TerrSet geospatial system. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(4), 135. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4261-z>
- Anand, V., & Oinam, B. (2020). Future land use land cover prediction with special emphasis on urbanization and wetlands. *Remote Sensing Letters*, 11(3), 225–234. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2019.1704304>
- Camacho-Sanabria, J.-M., Juan Pérez, J. I., Pineda Jaimes, N. B., (2015). Cambios de cobertura/uso del suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña. *Madera y bosques*, 21(1), 93–112.
- Camacho-Sanabria, R., Camacho-Sanabria, J. M., Balderas-Plata, M. Á., & Sánchez-López, M. (2017). Cambios de cobertura y uso de suelo: Estudio de caso en Progreso Hidalgo, Estado de México. *Madera y Bosques*, 23(3), 39–60. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2331516>
- Chuvieco, E. (2002). *Teledetección Ambiental. La Observación de la Tierra Desde el Espacio*. Ariel Ciencia.
- Cruz-Delgado, D., Leos-Rodríguez, J. A., & Altamirano-Cárdenas, J. R. (2013). México: Factores explicativos de la producción de frutas y hortalizas ante la apertura comercial. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 19(3), 267–278. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2012.05.029>
- Duval, V. S. (2017). Análisis temporal de la actual configuración espacial de áreas protegidas de la provincia de La Pampa. *Revista Universitaria de Geografía*, 2(26), 11–35.
- FAO. (1996). Forest resources assessment 1990—Survey tropical forest cover studies of change processes. Recuperado el 25 de agosto de 2022, de <https://www.fao.org/3/w0015e/w0015e00.htm>
- FAO. (2010). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010 | FAO. Recuperado el 25 de agosto de 2022, de <https://www.fao.org/family-farming/detail/en/c/288282/>
- Flores-Tecalco, A., García-Martínez, M.A., Serna-Lagunes, R., Ponce-Méndez, M. (2025). Respuesta de la diversidad de escarabajos coprófagos a las actividades de manejo en un paisaje de bosque mesófilo de montaña. *Madera y bosques* 31 (e312607):1-14. <https://doi.org/10.21829/myb.2025.312607>
- Florez-Yepes, G. Y., Rincon-Santamaría, A., Cardona, P. S., & Alzate Alvarez, A. M. (2017). Análisis multi-temporal de las coberturas vegetales en el área de influencia de las minas de oro ubicadas en la parte alta del sector de Maltería en Manizales, Colombia. *DYNA*, 84(201), 95. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n201.55759>
- Fragou, S., Kalogeropoulos, K., Stathopoulos, N. (2020). *Quantifying Land Cover Changes in a Mediterranean Environment Using Landsat TM and Support Vector Machines*.

- Gordillo-Ruiz, M. C., & Castillo-Santiago, M. A. (2016). Cambio de uso del suelo en la cuenca del río Sabinal, Chiapas, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4(10), 39. <https://doi.org/10.19136/era.a4n10.803>
- Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X., & Briggs, J. M. (2008). Global Change and the Ecology of Cities. *Science*, 319(5864), 756–760. <https://doi.org/10.1126/science.1150195>
- IICA, M. D. F. (México). (2020). *Aprendizajes y trayectorias del sector agroalimentario mexicano durante el TLCAN*. Recuperado de <https://repositorio.iica.int/handle/11324/11849>
- INEGI, I. N. de E. y. (2019). Temas. Recuperado el 25 de agosto de 2022, de <https://www.inegi.org.mx/temas/>
- Keenan, R. J., Reams, G. A., Achard, F., de Freitas, J. V., Grainger, A., & Lindquist, E. (2015). Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources Assessment 2015. *Forest Ecology and Management*, 352, 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.014>
- Lambin, E. F., & Geist, H. (Eds.). (2006). *Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes and Global Impacts*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/3-540-32202-7>
- Lesschen, J. P., Verburg, P., & Staal, S. (2005). Statistical Methods for Analysing the Spatial Dimension of Changes in Land Use and Farming Systems. *The International Livestock Research Institute, Nairobi, Kenya & LUCC Focus 3 Office, Wageningen University, the Netherlands*, (7), 82.
- Leta, M. K., Demissie, T. A., & Tränckner, J. (2021). Modeling and Prediction of Land Use Land Cover Change Dynamics Based on Land Change Modeler (LCM) in Nashe Watershed, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Sustainability*, 13(7), 3740. <https://doi.org/10.3390/su13073740>
- López-Pérez, Y., Tejero-Díez, J. D., Torres-Díaz, A. N., & Luna-Vega, I. (2011). Flora del bosque mesófilo de montaña y vegetación adyacente en Avándaro, Valle de Bravo, estado de México, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, (88), 35–53.
- López-Vazquez, V. H., Plata, M. Á. B., Mejía, M. C. C., Pérez, J. I. J., & Cedillo, J. G. G. (2015). Cambio de uso de suelo e implicaciones socioeconómicas en un área mazahua del altiplano mexicano. *CIENCIA ergo-sum*, 22(2), 136–144.
- Mas, J. F., Díaz-Gallegos, J. R., & Pérez-Vega, A. (2003). Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: Una revisión. *Investigaciones Geográficas*, (51). <https://doi.org/10.14350/rig.30414>
- Mas, J. F., & Flamenco-Sandoval, A. (2011). *Modelación de los cambios de coberturas/uso del suelo en una región tropical de México*. 24.
- Mas, J. F., Lemoine Rodríguez, R., González, R., López Sánchez, J., Piña Garduño, A., & Herrera Flores, E. (2017). Evaluación de las tasas de deforestación en Michoacán a escala detallada mediante un método híbrido de clasificación de imágenes SPOT. *Madera y Bosques*, 23(2), 119–132. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2321472>

- Monjardín-Armenta, S. A., Pacheco-Angulo, C. E., Plata-Rocha, W. et al., (2017). La deforestación y sus factores causales en el estado de Sinaloa, México. *Madera y bosques*, 23(1), 7–22. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2311482>
- Montilla-Pacheco, A. de J., Reyes-Rivero, A. C., & Agüero-Corzo, E. (2017). Análisis de Deforestación en Ecosistemas Boscosos del Refugio de Vida Silvestre Pacoche, Manabí Manta, Ecuador. *Revista de Investigación*, 41(92), 74–94.
- Partida-Sedas, S., Cabal-Prieto, A., Sánchez-Arellano, L., & Muñoz-Torres, J. P. (2017). Análisis de la Reducción Estructural Del Bosque Mesófilo De Montaña En Huatusco, Veracruz, Mexico. *Agro Productividad*, 10(6).
- Pineda-Jaimes, N. B., Bosque-Sendra, J., Gómez-Delgado, M., & Franco-Plata, R. (2011). Análisis de los factores inductores de los cambios ocurridos en la superficie forestal del estado de México en el período 1993-2000. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (56), 9–34.
- 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.
- Pontius, R. G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 101(2), 251–268. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.008>
- Rahnama, M. R. (2021). Simulation of land use land cover change in Melbourne metropolitan area from 2014 to 2030: Using multilayer perceptron neural networks and Markov chain model. *Australian Planner*, 57(1), 36–49. <https://doi.org/10.1080/07293682.2021.1920994>
- Ramos-Reyes, R., & Palomeque-de la Cruz, M. Á. (2017). Modelación del cambio de uso del suelo en Comalcalco, Tabasco, México. *Revista de Urbanismo*. <https://doi.org/10.5354/0717-5051.2017.47986>
- Ramos-Reyes, R., Palomeque-De la Cruz, M. Á., Megía-Vera, H. J. et al., (2021). Modelo del cambio de uso de suelo en el sistema lagunar Carmen-Pajonal-Machona, México. *Terra Latinoamericana*, 39. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.587>
- Ramos-Reyes, R., Palomeque-de la Cruz, M. Á., Megía-Vera, H. J., & López-Benitez, P. (2019). Modelación del cambio de uso del suelo en la Zona Costera: Cuauhtemotzin-El Pailebot, Tabasco, México.
- Reynoso-Santos, R., Valdez-Lazalde, J. R., Escalona-Maurice, M. J., de los Santos-Posadas, H. M., & Pérez-Hernández, M. J. (2016). Cadenas de Markov y autómatas celulares para la modelación de cambio de uso de suelo. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 37(1), 72–81.
- Sahagún-Sánchez, F. J., & Reyes-Hernández, H. (2018). Impact of land use cover change on protected natural areas in central region of Sierra Madre Oriental, Mexico. *CienciaUAT*, 12(2), 6–21.
- Sánchez-Muñoz, J. M. (2016). Análisis de Calidad Cartográfica mediante el estudio de la Matriz de Confusión. *Pensamiento Matemático*, 6(2), 9–26.

- Singh, B., Venkatramanan, V., & Deshmukh, B. (2022). Monitoring of land use land cover dynamics and prediction of urban growth using Land Change Modeler in Delhi and its environs, India. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20900-z>
- Torres-Lima, P. & Madrigal-Gómez, J. (2025). Assessment of peri-urban dynamics and agricultural traditionality in a mega-city by using a hybrid geospatial model. A case study in Mexico. In Sahana, M. (ed) *Remote Sensing and GIS in Peri-urban Research. Perspectives on Global Change, Sustainability and Resilience*, Modern Cartography Series. Vol. 11, Elsevier, Netherlands. Pp.663-685, <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15832-2.00029-0>