



DOI: 10.29298/rmcf.v16i92.1573

Artículo de investigación

Modelación espacial del estado de conservación y escenarios futuros en el oriente de Tabasco, México

Spatial modeling of the conservation state and future scenarios in Eastern *Tabasco*, Mexico

Alex Ricardo Ramírez García¹, Miguel Ángel Palomeque de la Cruz^{2*},
Victorio Moreno Jiménez¹, Santa Dolores Carreño Ruiz¹, Abisag Antonieta
Ávalos Lázaro¹, Tania Gudelia Núñez Magaña²

Fecha de recepción/Reception date: 10 de mayo de 2025

Fecha de aceptación/Acceptance date: 1 de octubre de 2025

¹Facultad Maya de Estudios Agropecuarios, Universidad Autónoma de Chiapas. México.

²División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México.

*Autor para correspondencia; correo-e: miguel.palomeque@ujat.mx

*Corresponding author; e-mail: miguel.palomeque@ujat.mx

Resumen

Se modeló el cambio de uso del suelo en el Oriente de Tabasco (OT) con el módulo *Land Change Modeler (LCM) for ecological sustainability* del software *TerrSet liberaGIS®*, durante el periodo 2000-2019. Además, se creó un escenario probabilístico y espacial (2030) mediante Cadenas de *Markov* y Autómatas celulares. Los resultados indicaron que durante 2000 y 2019 dominaron los usos agropecuarios y forestales, que en conjunto representaron 60 %; el resto de las coberturas cubrieron poca superficie: cuerpo de agua y humedal (7.9 %), selva alta perennifolia (5 %), selva mediana perennifolia y subperennifolia (2.4 %), selva baja inundable (2.6 %), y acahual (14.8 %). En la proyección espacial a 2030, se observó un ligero crecimiento de los usos agropecuarios (60.3 %), el aumento de los asentamientos humanos (1.5 %), y de la palma de aceite (2.1 %). No obstante que, las actividades productivas continuarán siendo dominantes; sobresale que las selvas altas, medias y bajas permanecerán estables con 5.2, 2.8 y 2.6 %; contrario a la situación de los cuerpos de agua y humedales, que seguirán perdiendo superficies importantes, tal como lo indica la proyección espacial. Para conservar los remanentes de selvas y humedales que aún existen, es importante que los ordenamientos ecológicos tengan criterios claros de regulación ecológica y la visión de desarrollo sostenible. Asimismo, se debe fortalecer la conservación, restauración y aprovechamiento sostenible del Área de Protección de Flora y Fauna Cañón del Usumacinta, y de la Reserva de la Biosfera *Wanha'*.

Palabras clave: Actividades agropecuarias, autómatas celulares, Cadenas de *Markov*, modelador del cambio de uso de suelo, plantaciones forestales, selva alta perennifolia.

Abstract

Land use change in Eastern *Tabasco* (ET) was modeled using the Land Change Modeler (LCM) for the ecological sustainability module of the TerrSet liberaGIS® software, covering the period 2000-2019. In addition, a probabilistic and spatial scenario (2030) was created using Markov chains and Cellular automata. The results indicated that during 2000 and 2019, agricultural and forest uses dominated, together accounting for 60 %. The rest of the land cover types covered a small area: water bodies and wetlands (7.9 %), evergreen rain forest (5 %), medium evergreen and semi-evergreen forest (2.4 %), lowland floodplain forest (2.6 %), and fallow lands (14.8 %). The spatial projection to the year 2030 pointed to a slight increase in agricultural use (60.3 %), human settlements (1.5 %), and oil palm plantations (2.1 %). Although productive activities will continue to dominate, high, medium, and low forests will remain stable at 5.2, 2.8, and 2.6 %, respectively, contrary to the situation of water bodies and wetlands, which will continue to lose significant areas, as indicated by the spatial projection. In order to preserve the remaining forests and those wetlands that still exist, it is important that ecological zoning plans have clear criteria for ecological regulation and a vision of sustainable development. Likewise, conservation, restoration and sustainable use of the *Usumacinta* Canyon Flora and Fauna Protection Area and the *Wanhá* Biosphere Reserve must be strengthened.

Key words: Agricultural activities, cellular automata, Markov chains, land use change modeler, forest plantations; evergreen rain forest.

Introducción

La degradación de los ecosistemas amenaza el mantenimiento de la biodiversidad, sobre todo porque tiene efectos negativos en la función y dinámica de los sistemas ecológicos a diferentes escalas espaciales y temporales (Pérez-Vega et al., 2020). Entre las consecuencias del cambio de uso del suelo en zonas tropicales destacan la pérdida de la biodiversidad, el cambio climático, la desertificación, contaminación atmosférica, degradación del suelo y el déficit alimentario (Castellanos-Navarrete et al., 2021).

En México, la deforestación y la pérdida de las coberturas de los humedales magnificaron la fragmentación de los ecosistemas, y en conjunto con el cambio climático, provocarán escasez de agua, lluvias esporádicas y anticipadas en regiones áridas y semiáridas (Rodríguez-Moreno et al., 2017).

Tabasco es un estado biológicamente diverso, tiene diferentes ecosistemas naturales, intrincados y complejos por sus características agroclimáticas (Palma-López et al., 2011). Durante el siglo XX, en el estado se tuvo el deterioro de sus coberturas naturales, producto de la deforestación de las selvas tropicales y la pérdida de humedales, para el establecimiento de usos agropecuarios derivados del Plan Chontalpa y El Plan Balancán-Tenosique (Pinkus-Rendón & Contreras-Sánchez, 2012). Además, el *boom* petrolero en los años 70 ocasionó más de 50 % de la reducción de los humedales lacustres y palustres (Landgrave & Moreno-Casasola, 2012).

En 1947, la región Los Ríos, Tabasco presentaba la mayor cobertura de vegetación natural (82.3 %), que predominaba en la zona serrana y lomeríos, con la selva alta perennifolia; mientras que la zona de planicie era dominada, principalmente, por selva baja inundable (61.5 %) (Ramírez-García et al., 2022). Sin embargo, la gran devastación de la selva alta perennifolia inició en la primera década del siglo XX con las actividades agrícolas y la ganadería bovina que se fortaleció a partir de la crisis platanera de mediados del siglo XX (Manjarrez-Muñoz et al., 2007). En 1984, el pastizal ya ocupaba más de la mitad de la región (54.3 %) (Gallardo-Cruz et al., 2019). Se estima que la selva alta perennifolia y la selva fragmentada solo ocupaban 12.9 % (Ramírez-García et al., 2022).

En este estudio, se emplea el análisis del uso del suelo y vegetación y la predicción de tendencias como información útil para que los planificadores y tomadores de decisiones propongan acciones de desarrollo sustentable y ordenamiento territorial ante la degradación del territorio (Ramírez-García et al., 2022). Por lo tanto, los objetivos fueron: (1) modelar el cambio de uso del suelo en el Oriente de Tabasco, mediante herramientas como *Land Change Modeler (LCM) for Ecological Sustainability*, en el periodo 2000-2019; y (2) diseñar un escenario probabilístico y espacial para el año 2030, a partir del uso de Cadenas de *Markov* y Autómatas celulares

Materiales y Métodos

Área de estudio

El Oriente de Tabasco (OT) comprende los municipios Balancán, Emiliano Zapata y Tenosique, al sureste de la república mexicana (Figura 1); con un área de 6 234.2 km² que representa 24.7 % de la entidad. La región colinda al norte con el estado de Campeche, al este y sur comparte frontera internacional con la República de Guatemala y al suroeste con el estado de Chiapas. De norte a sur, prevalecen los climas cálido subhúmedo con lluvias en verano (Aw), cálido húmedo con lluvias abundantes en verano (Am) y cálido húmedo con lluvias abundantes todo el año (Af); la precipitación media anual varía de 1 600 a 2 000 mm y la temperatura media anual oscila de 26 a 28 °C (Aceves-Navarro & Rivera-Hernández, 2019). El territorio presenta regiones geomorfológicas de terrazas costeras y kársticas, planicie fluvial activa y montaña inclinada kárstica (Zavala-Cruz et al., 2016).

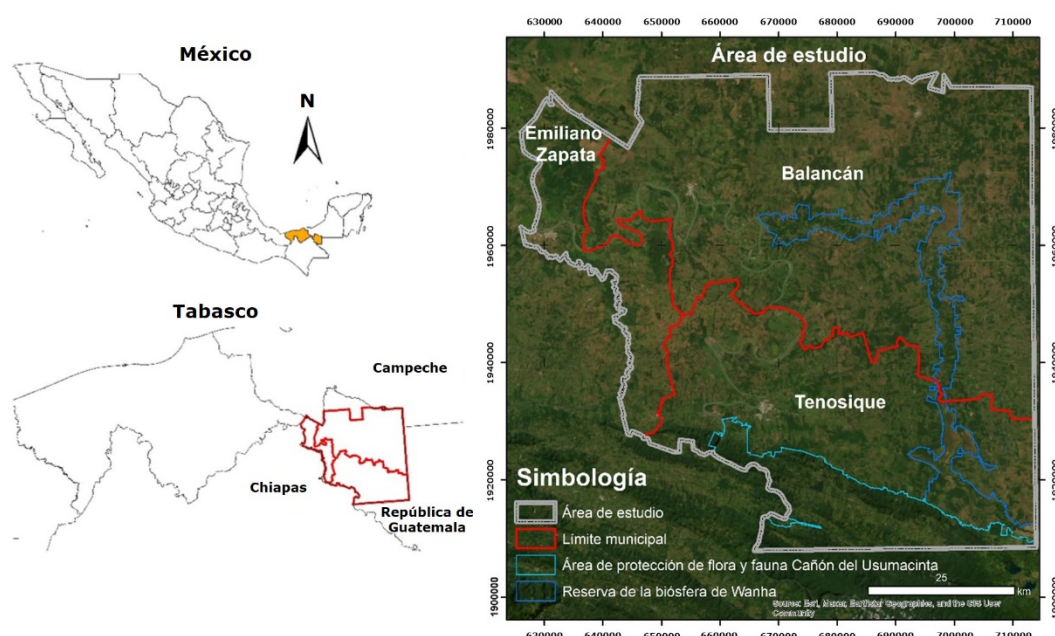


Figura 1. Ubicación geográfica de los municipios que abarcan el Oriente de Tabasco, México.

Adquisición de imágenes satelitales

Las imágenes satelitales multiespectrales, desde el visible hasta el infrarrojo medio, se obtuvieron en el portal del Servicio Geológico de Estados Unidos de América (USGS, por sus siglas en inglés) (United States Geological Survey [USGS], 2019). Se utilizó una imagen del año 2000, *Landsat 5 Thematic Mapper (TM)* con una resolución espacial de 30×30 m. La primera correspondió al 5 de diciembre de 1999 y la segunda del *Landsat 8 Operational Land Imager-Thermal Infrared Sensor (OLI-TIRS)* con resolución espacial de 30×30 m y fecha del 5 de julio de 2019.

Descripción de las coberturas y usos de suelo

Cultivo de ciclo corto: su ciclo vegetativo dura menos de un año como el maíz, frijol, etc.; cultivo anual: ciclo vegetativo de 12 a 24 meses como la caña de azúcar; palma de aceite: cultivo agroindustrial oleaginoso para la producción de aceite; pastizal: comunidades herbáceas de gramíneas de origen natural o inducidas; plantación forestal: especies cultivadas para la obtención de madera o resinas; humedales: comunidades vegetales acuáticas, enraizadas y flotantes; acahual: fase sucesional de la vegetación removida o perturbada; selva baja inundable: vegetación menor de 15 m que se desarrolla sobre suelos anegados temporal o permanentemente; selva mediana perennifolia y subperennifolia: asociaciones vegetales arbóreas de climas tropicales, 50 y 75 % de sus especies pierden las hojas en una parte del año; selva alta perennifolia: asociaciones vegetales tropicales: más de 75 % de sus especies conservan su follaje todo el año; cuerpos de agua: ríos, lagos, lagunas, etc.; suelo desnudo: zonas desprovistas de vegetación; asentamientos humanos: establecimiento de un conglomerado demográfico (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI], 2017).

Clasificación de las imágenes satelitales del 2000 y 2019

Para la obtención de los mapas de coberturas y uso de suelo 2000 y 2019 (Figura 2), se aplicó la técnica de clasificación supervisada, a partir del conocimiento previo

del área de estudio y la revisión de cartografía histórica. Las imágenes satelitales multiespectrales se procesaron con el complemento *Semi-Automatic Classification* del *software* de acceso libre QGIS 3.8.3 (QGIS Development Team, 2025), para ello se utilizó el algoritmo de máxima verosimilitud que examinó la función de probabilidad de cada clase y asignó a cada pixel la clase con la mayor probabilidad; las firmas espectrales utilizadas fueron las combinaciones de bandas RGB 3-2-1 y 4-3-2.

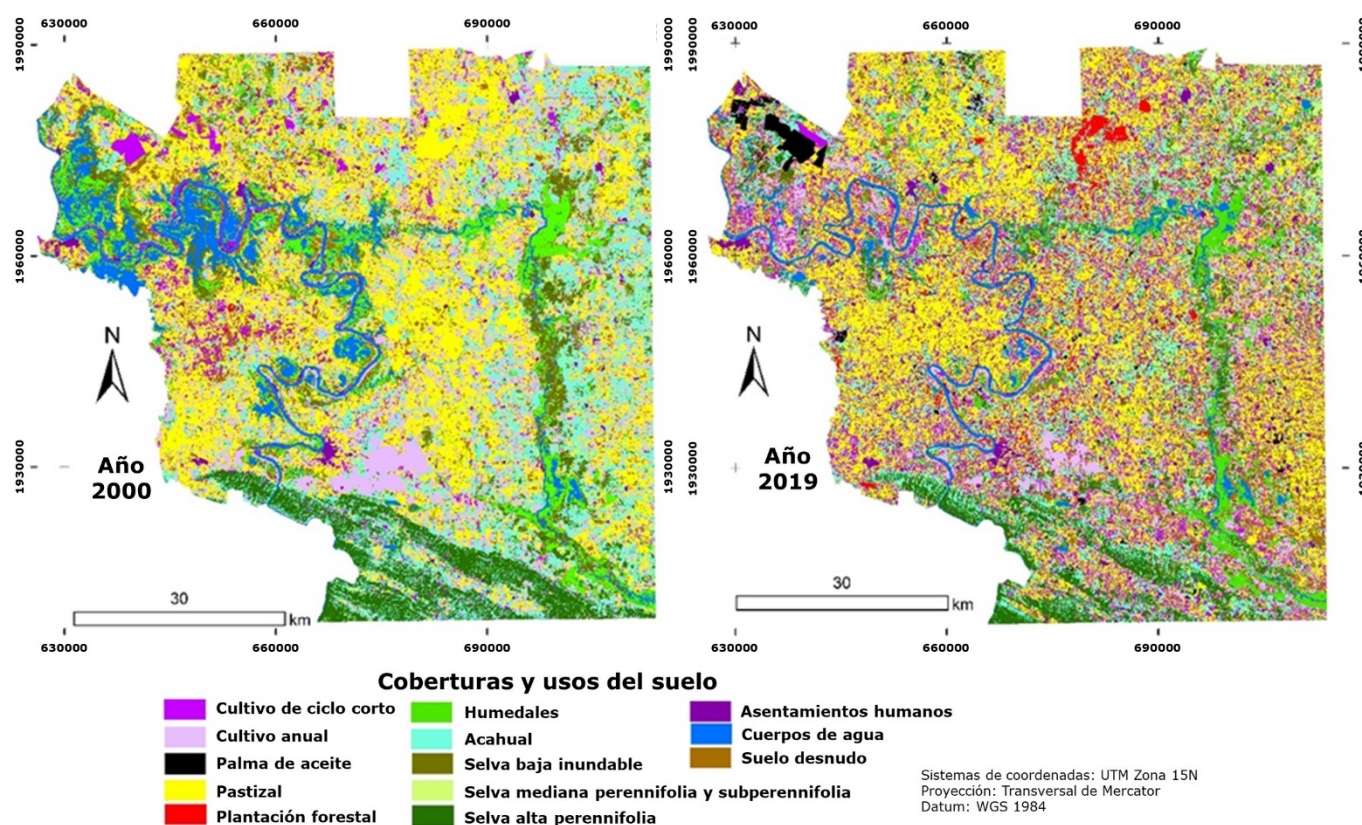


Figura 2. Mapa de coberturas y usos de suelo 2000 y 2019.

Modelación del cambio de uso del suelo 2000-2019

Para realizar el análisis espacio temporal durante el periodo 2000-2019, se ejecutó el cruce de las imágenes ráster con el módulo *Land Change Modeler (LCM) for Ecological Sustainability* integrada en *TerrSet liberaGIS®* (Eastman, 2024). Se empleó el comando *CrossTab* para validar la matriz de probabilidad (Eastman, 2024). El cruce de las imágenes entre los años 2000 y 2019 (Figura 2) se generó con una matriz y un estadístico *Overall Kappa*: 0.89, lo cual demostró que el cruce de los dos periodos era confiable para el análisis de cambio de uso del suelo del territorio (Eastman, 2024). Los resultados incluyeron el resumen de las matrices con la superficie de cada categoría, en comparación con otras.

Probabilidades de cambio con Cadenas de Markov 2030

Con el comando *Markov* de *TerrSet liberaGIS®* (Eastman, 2024), se creó una matriz de probabilidad de transición. El método consistió en cruzar mapas de uso del suelo en dos periodos, con un margen de error de 15 %, para generar una matriz de probabilidad de cambios en un tercer periodo (Eastman, 2024). La matriz markoviana se creó con las imágenes del 2000 y 2019; los resultados fueron una matriz de probabilidades de cambios (2030), y una colección de imágenes de áreas de adecuación/aptitud (2030) que contiene el número de pixeles que se espera cambien de una clase de uso a otra durante un periodo de tiempo (Eastman, 2024).

Creación de escenarios con Autómatas celulares 2030

Se emplearon los Autómatas celulares mediante el comando *CA-Markov* de *TerrSet liberaGIS*® (Eastman, 2024), para simular un escenario de vegetación y usos del suelo para el año 2030. El escenario espacial para el 2030 (Figura 3) se construyó a partir de la imagen de coberturas y uso de suelo 2019, la matriz de probabilidades de cambios (2030), y la colección de imágenes de áreas de adecuación/aptitud (2030). Para validar la precisión de la proyección del año 2030, se utilizó el comando *VALIDATE*. Este calculó el estadístico *Kappa* (*K*) para indicar el grado de acuerdo entre dos mapas, ambos en sentido general y sobre una base por categoría (Eastman, 2024). La proyección espacial (2030) presentó una precisión global *Kappa*: $K_{standard}=0.76$ %, $K_{no}=0.78$ %, $K_{location}=0.78$ %, y $K_{locationStrata}=0.78$ %.

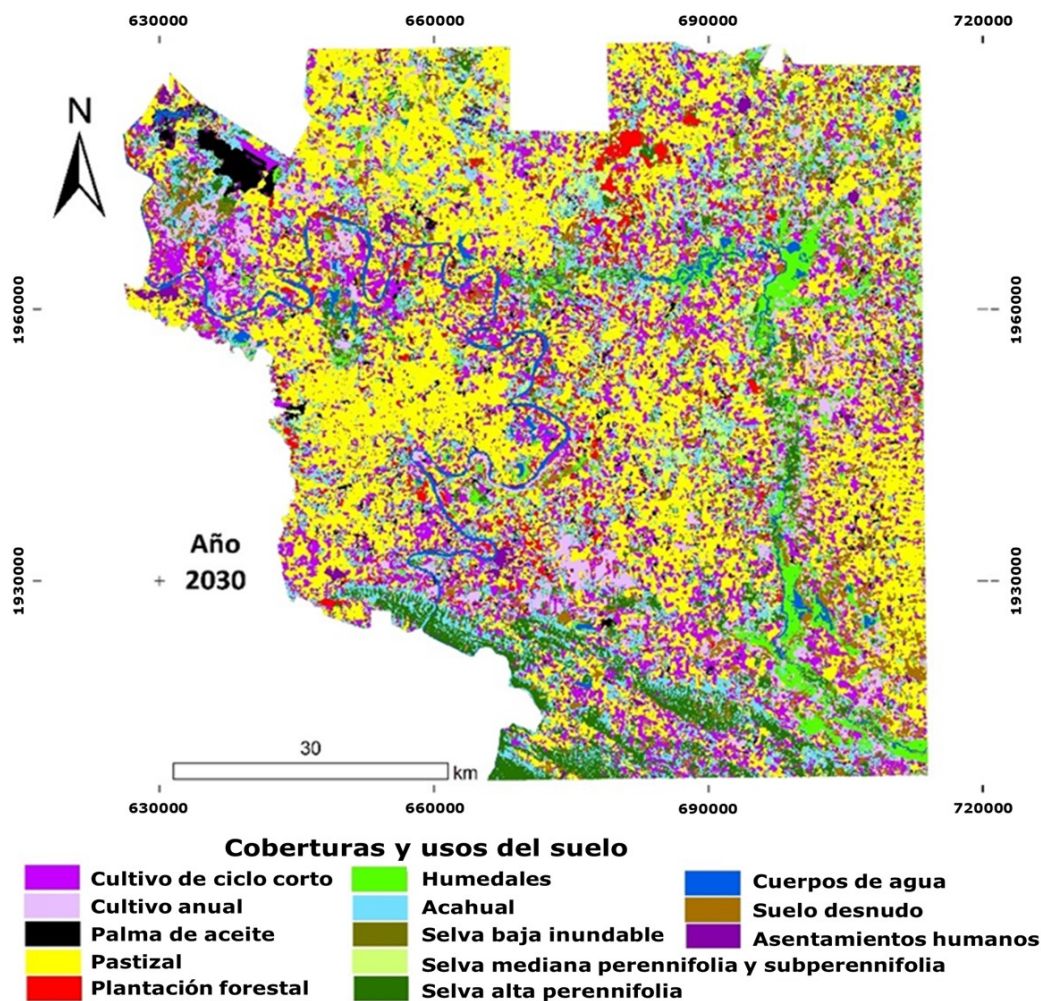


Figura 3. Escenario resultante de coberturas y uso de suelo para el año 2030.

Modelación del cambio de uso del suelo 2019-2030

La imagen de coberturas y uso de suelo 2019 se cruzó con la proyección del 2030 mediante los módulos *Land Change Modeler* y *CrossTab* para obtener las matrices de cambio y el estadístico *Kappa* (K)=0.76 (Eastman, 2024).

Cálculo de las tasas de cambio

Las tasas de cambio de uso del suelo se calcularon mediante la siguiente fórmula (Palacio-Prieto et al., 2004):

$$d = \left[\left(\frac{S2}{S1} \right)^{\frac{1}{n-1}} \right] 100$$

Donde:

d = Tasa de cambio anual (en porcentaje)

$S1$ = Área cubierta por determinado uso del suelo al inicio del periodo

$S2$ = Área cubierta por determinado uso del suelo al final del periodo

n = Número de años del periodo de análisis

Resultados y Discusión

Cambio de uso del suelo 2000-2019

Las coberturas y uso de suelo predominantes para el año 2000 fueron: pastizales, el cultivo anual (caña de azúcar), acahuales, humedales, selva baja inundable y cuerpos de agua (Cuadro 1). En el año 2019, las categorías dominantes fueron:

pastizales, cultivo de ciclo corto (maíz, frijol, calabaza, etc.), acahuales y cultivo anual (Cuadro 1). Es evidente que las actividades principales en el OT correspondieron a la ganadería, agricultura (Ramírez-García *et al.*, 2022) y actividad forestal principalmente de especies introducidas (Trujillo-Ubaldo *et al.*, 2018). Se observaron pequeños remanentes de vegetación natural, sobre todo, de selvas que en algún tiempo fueron la cobertura dominante y que ha sido deforestada debido al uso agropecuario (Palomeque-de la Cruz *et al.*, 2019).

Cuadro 1. Cuantificación de coberturas y uso de suelo durante 2000-2019.

Coberturas y uso de suelo	2000 (km²)	%	2019 (km²)	%	Tasa de cambio
Cuerpos de agua	330	6	169	3.1	-3.4
Suelo desnudo	263	4.8	292	5.3	0.6
Asentamientos humanos	51	0.9	64	1.2	1.2
Humedales	402	7.3	264	4.8	-2.2
Acahual	823	15	812	14.8	-0.1
Selva baja inundable	323	5.9	141	2.6	-4.3
Selva mediana perennifolia y subperennifolia	71	1.3	132	2.4	3.3
Selva alta perennifolia	314	5.7	275	5	-0.7
Cultivo de ciclo corto	301	5.5	864	15.8	5.7
Cultivo anual	884	16.1	357	6.5	-4.7
Palma de aceite	0	0	93	1.7	0.0
Pastizal	1 690	31	1 754	32	0.2
Plantación forestal	6	0.1	241	4.4	21.2
Total	5 478	100	5 478	100	

Los cambios de uso de suelo más notables entre el año 2000 y 2019 fueron el aumento del cultivo de ciclo corto de 5.5 a 15.8 %, con una tasa de cambio positiva de 5.5 % (Cuadro 1); lo anterior fue incentivado, principalmente, por el programa “Sembrando vida” en los municipios Balancán, Tenosique y Emiliano Zapata

(Gutiérrez-San Pallo et al., 2019), que generó el aumento de las superficies agrícolas de cultivos básicos como maíz, frijol, calabaza y chigua.

Las plantaciones forestales son implementadas por iniciativa privada y programas de gobierno. Estas crecieron de 0.1 a 4.4 %, con tasa de cambio positiva de 21.2 % (Cuadro 1); destacaron las de eucalipto (*Eucalyptus grandis* W. Mill ex Maiden), teca (*Tectona grandis* L. f.), melina (*Gmelina arborea* Roxb. ex Sm.), cedro australiano (*Toona ciliata* M. Roem.), caoba africana (*Khaya ivorensis* A. Chev.), y en menor medida plantaciones de especies nativas: cedro (*Cedrela odorata* L.) y caoba (*Swietenia macrophylla* King).

El desarrollo del cultivo de palma de aceite es de las principales actividades que se han expandido en el OT (Hernández-Rojas et al., 2018; Trujillo-Ubaldo et al., 2018), con un incremento de 1.7 %, el cual es similar a lo ocurrido en el sur de Tailandia; donde dicho cultivo aumentó de 0.04 a 6.84 % (Srisunthon & Chawchai, 2020). Lo anterior ha impactado, directamente, los pocos remanentes de selvas y acahuales presentes en el OT (Cuadro 1).

En el municipio Tenosique existe un remanente significativo de selva alta perennifolia localizado dentro del Área de Protección de Flora y Fauna “Cañón del Usumacinta”. No obstante, entre los años 2009 y 2016 esta cobertura vegetal experimentó una pérdida acumulada de 1 625 ha, como resultado de procesos de cambio de uso del suelo. De esta superficie, aproximadamente 1 231 ha se transformaron en terrenos destinados a actividades agropecuarias, y únicamente 394 ha evolucionaron hacia vegetación secundaria (Palomeque-de la Cruz et al., 2025). A pesar de que las geoformas no son aptas para realizar estas actividades productivas, ya que se encuentran en zonas con pendientes abruptas, siguen siendo explotadas (Gutiérrez-San Pallo et al., 2019; Palomeque-de la Cruz et al., 2019).

Los usos de suelo que disminuyeron en superficie en el OT fueron los cultivos anuales de 16.1 a 6.5 %, con una tasa de cambio negativa de 4.7 % (Cuadro 1).

Los humedales presentaron un decremento de 7.3 a 4.8 % con tasa de cambio negativa de 2.2 %, y los cuerpos de agua de 6 a 3.1 % con tasa de cambio negativa de 3.4 % (Cuadro 1). Estos ecosistemas se ubican principalmente en la Reserva de la Biosfera *Wanha'* y están afectados, debido a que sus márgenes pierden territorio por prácticas agropecuarias, en particular, durante la época de estiaje (Ramos-Reyes et al., 2021; Srisunthon & Chawchai, 2020).

Principales transiciones de cambios de uso de suelo 2000-2019

Los usos agropecuarios presentaron transiciones principalmente en las superficies de pastizales, cultivos anuales y acahuales que se transformaron en cultivos de ciclo corto (Figura 4). Como se indicó, esto fue propiciado por el programa federal de "Sembrando vida", debido a que los responsables de registrar a los productores exigían tener un predio limpio y cultivable, en lugar de los acahuales; por lo que se realizaron prácticas de roza, tumba y quema para limpiar e ingresar al programa, lo mismo sucedió en otros estados beneficiados con ese programa federal (Cortez-Egremy et al., 2022; Gutiérrez-San Pallo et al., 2019).

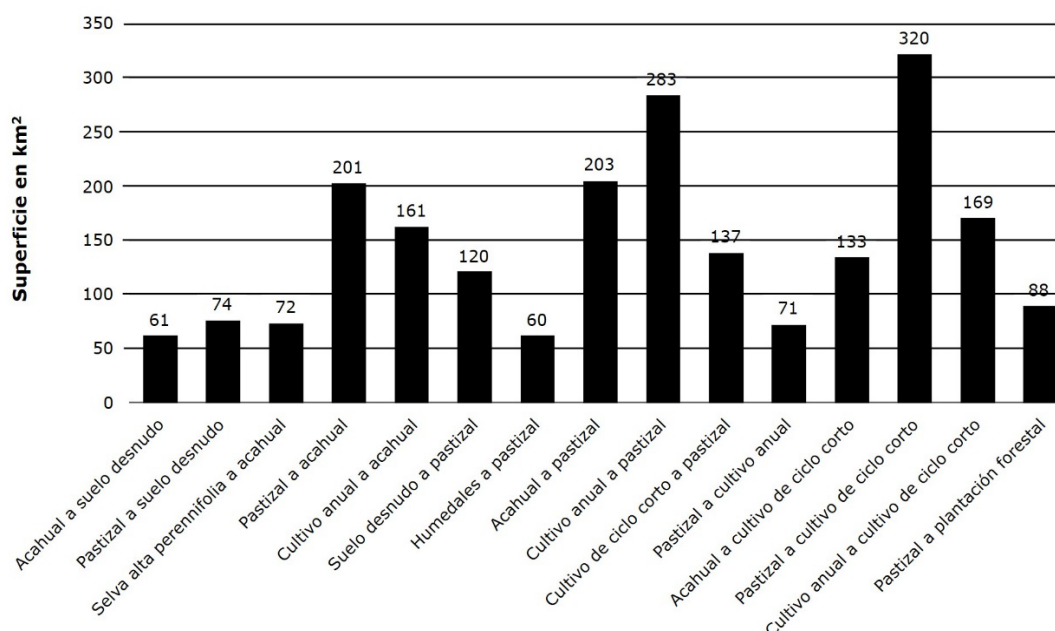


Figura 4. Principales transiciones de cambios de uso de suelo en el periodo 2000-2019.

Los cultivos anuales, acahuales, cultivo de ciclo corto, humedales y suelo desnudo cambiaron a pastizales (Figura 4) utilizados para la ganadería bovina extensiva, la cual es una actividad económica importante en el OT (Manjarrez-Muñoz et al., 2007; Ramírez-García et al., 2022); con el tiempo esta actividad sigue con un crecimiento dinámico a lo largo de las décadas en detrimento de otros usos de suelo y coberturas naturales (Rodríguez-Medina et al, 2017; Srisunthon & Chawchai, 2020).

Las superficies de pastizal están transformándose a plantaciones forestales (Figura 4), actividad reciente en el OT que busca satisfacer la demanda de madera como materia prima para abastecer la industria forestal, disminuir la presión sobre los remanentes de selvas, aumentar los ingresos de las familias rurales con la generación de empleos (Trujillo-Ubaldo et al., 2018), y proveer los servicios ecosistémicos que se han perdido a causa de la deforestación. Otras áreas de usos agropecuarios abandonadas, se han regenerado de manera natural y han formado

superficies de acahual (Palomeque-de la Cruz et al., 2019; Ramos-Reyes et al., 2021).

La selva alta perennifolia está siendo transformada en acahuales (Figura 4). Al igual que en otras partes del mundo, hay problemas asociados a la pérdida de la biodiversidad relacionados con la disminución de especies arbóreas y de otras asociadas; sus causas son procesos antrópicos, como la extracción de árboles primarios o maderas preciosas para el comercio ilegal de la madera utilizada para construcción, muebles, leña, entre otros usos (Cabrera-Pérez et al., 2013; Sari et al., 2023).

Proyecciones de cambio de uso de suelo para 2019-2030

La dinámica de cambio de uso de suelo durante 2019-2030 predice que los cuerpos de agua tenderán a disminuir constantemente (3.1 a 2.3 %), y como efecto directo se reducirán los ecosistemas de humedales (4.8 a 4.1 %) en el OT. Resultados similares se documentan para el resto del estado de Tabasco, a causa del crecimiento de los usos agropecuarios (Ramos-Reyes & Palomeque-de la Cruz, 2023) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Cuantificación de coberturas y uso de suelo durante el periodo 2019-2030.

Coberturas y uso de suelo	2019	%	2030	%
Cuerpos de agua	169	3.1	123	2.3
Suelo desnudo	292	5.3	283	5.2
Asentamientos humanos	64	1.2	82	1.5
Humedales	264	4.8	221	4.1
Acahual	812	14.8	768	14.1
Selva baja inundable	141	2.6	140	2.6
Selva mediana perennifolia y subperennifolia	132	2.4	150	2.8
Selva alta perennifolia	275	5	284	5.2
Cultivo de ciclo corto	864	15.8	855	15.7
Cultivo anual	357	6.5	321	5.9
Palma de aceite	94	1.7	116	2.1
Pastizal	1 754	32	1 873	34.3
Plantación forestal	241	4.4	242	4.4
Total	5 479	100	5 458	100

Los humedales en México están sujetos a una presión similar, que se suma el crecimiento urbano, extracción de petróleo y turismo (Rodríguez-Arias et al., 2018). La disminución de los humedales genera preocupación por la pérdida de diversos servicios ecosistémicos, lo que origina vulnerabilidad ecológica (Assefa et al., 2021; Srisunthon & Chawchai, 2020). En el caso de los acahuales, también tienden a disminuir en la proyección del periodo 2030 (Cuadro 2). Su pérdida significativamente al cambio climático. Al ser drenados o destruidos, liberan grandes cantidades de carbono almacenado en sus suelos, ello incrementa los gases de efecto invernadero; además, disminuye la capacidad de regular el clima (Mei et al., 2024). El cultivo anual presenta pérdidas (Cuadro 2), debido al abandono de cultivo de caña de azúcar (Ramírez-García et al., 2022).

Los usos de suelo con probabilidades de aumentos, según el modelo de *CA-Markov* son, especialmente, los asentamientos humanos (1.2 a 1.5 %) (Cuadro 2), debido

al incremento de la población humana se expanden continuamente (Girma et al., 2022). El cultivo de palma de aceite es una actividad agroindustrial que ha crecido en superficie y continuará incrementándose en el OT, de acuerdo a las predicciones del modelo (Hernández-Rojas et al., 2018); este cultivo se ha promovido en las fronteras como una forma de modernizar las zonas rurales (Castellanos-Navarrete et al., 2021; Srisunthon & Chawchai, 2020) (Cuadro 2).

Para los pastizales, se pronostica el incremento de 32 a 34.3 % (Cuadro 2), y constituye el uso dominante en la mayoría de los estudios de cambio de uso de suelo realizados en Tabasco, el país y en otras zonas tropicales (Assefa et al., 2021; Palomeque-de la Cruz et al., 2019; Sari et al., 2023). No obstante, puede estar sujeto a cambios en función de las actividades agrícolas y forestales que se practiquen, como lo señalan Girma et al. (2022), quienes proyectan una drástica disminución para 2050, resultado de la afectación por otros usos de suelo. Las coberturas y usos de suelo que no presentan cambios aparentemente significativos son la selva baja inundable, selva mediana perennifolia y subperennifolia, selva alta perennifolia, plantaciones forestales y cultivo de ciclo corto (Cuadro 2).

Transiciones proyectadas para el 2019-2030

Las superficies de usos agropecuarios son representativas en el OT y también se denota que hay usos como el cultivo de palma de aceite y las plantaciones forestales que son prácticas recientes, por ello las transiciones de uso de suelo para el periodo 2019-2030 son dinámicas, y se observa la transformación del cultivo de ciclo corto a pastizal y plantaciones forestales (Figura 5). Los pastizales se convertirán en zonas de cultivos de ciclo corto, plantaciones forestales y palma de

aceite (Figura 5), esta última muestra una tendencia al aumento. Dichas dinámicas son similares a las citadas a nivel nacional y otros países del trópico (Castellanos-Navarrete et al., 2021; Ramos-Reyes & Palomeque-de la Cruz, 2023; Sari et al., 2023).

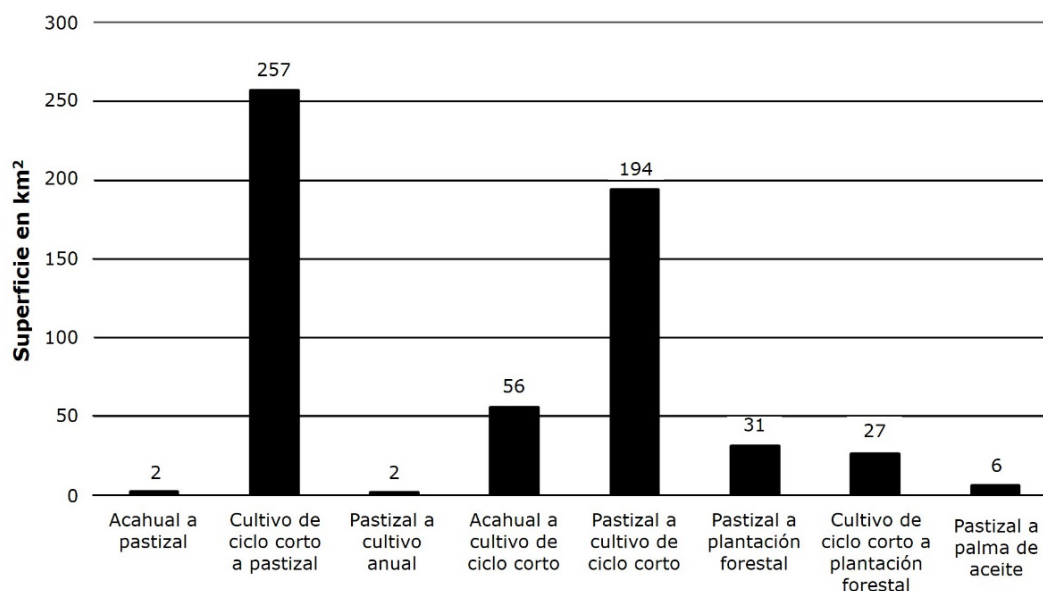


Figura 5. Transiciones pronosticadas para el periodo 2019-2030.

Los acahuales tienden a transformarse en cultivos de ciclo corto y pastizal (Figura 5). Es importante señalar que en el OT se realiza el barbecho, la cual es una de las prácticas culturales de los productores que consiste en dejar descansar (que se desarrolle el acahual) el terreno durante un lapso determinado, para que el suelo recupere su fertilidad y esté en condiciones favorables para nuevamente practicar la agricultura (Licona & Estupiñan, 2019).

La integración de los modelos geomáticos con base en transición: *Land Change Modeler*, Cadenas de *Markov* (*Markov*) y Autómatas celulares (*CA-Markov*) ayuda a comprender las tendencias y direcciones de las coberturas y usos de suelo. Estos

resultados son útiles para prevenir problemas como la sequía, las inundaciones y la erosión de suelo, además de contribuir a comprender las causas de los problemas ambientales más importantes y evaluar el impacto futuro del cambio de uso de suelo, para proponer el uso sostenible de los recursos naturales para mitigar el cambio climático (Principi, 2022).

Conclusiones

La modelación del cambio de uso de suelo en el Oriente de Tabasco para el periodo 2000-2019 resalta la dominancia de los usos de suelo agropecuarios y forestales con 60 %; las coberturas de selvas altas perennifolias, medianas perennifolias y subperennifolias y selvas bajas inundables solo representan 10 %. Los usos agropecuarios presentan cambios dinámicos. Los pastizales pierden superficies al ser transformados a cultivos de ciclo corto, cultivo anual, plantación forestal y acahual. Contrario a los cultivos de ciclo corto que aumentan en superficie sobre el cultivo anual, pastizal y acahual. La cobertura de selva alta perennifolia se transforma en acahual y los humedales se convierten en pastizales.

El escenario probabilístico y espacial para el año 2030 evidencia cambio de uso de suelo, proporcionando las posibles distribuciones espaciales en el Oriente de Tabasco. Así, los cuerpos de agua solo cubrirán 2.3 %; es decir, se reducirá en 3.7 % lo que representa la pérdida de 61.6 % del agua del OT, y en consecuencia los

humedales también disminuirán su superficie respecto a la del 2000 (7.3 %) en 43.8 %.

El uso del *Land Change Modeler (LCM)*, combinado con Cadenas de *Markov* y Autómatas celulares constituye una herramienta fundamental para analizar y proyectar los cambios de uso de suelo hacia el futuro. Asimismo, permite evaluar los impactos potenciales sobre la cobertura vegetal y los servicios ecosistémicos. La sinergia entre estos métodos fortalece la planificación territorial, fomenta políticas de conservación y para la mitigación de los efectos del crecimiento urbano o la expansión agropecuaria. En conjunto, este enfoque es una base científica para promover estrategias orientadas a la resiliencia ecológica y al uso racional del suelo en el contexto del cambio climático.

Agradecimientos

A la Benemérita Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad Maya de Estudios Agropecuarios, y a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas, por facilitar sus instalaciones para la realización de este trabajo de investigación.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Alex Ricardo Ramírez García: elaboración de las clasificaciones supervisadas y análisis de la información; Miguel Ángel Palomeque de la Cruz: modelación del cambio de uso del suelo y redacción del manuscrito; Victorio Moreno Jiménez: identificación de los tipos de coberturas y usos de suelo del área de estudio; Santa Dolores Carreño Ruiz: identificación de los tipos de coberturas y usos de suelo del área de estudio; Abisag Antonieta Ávalos Lázaro: identificación de los tipos de coberturas y usos de suelo, análisis de los resultados, redacción y estilo; Tania Gudelia Núñez Magaña: apoyo en la redacción final.

Referencias

- Aceves-Navarro, L. A., y Rivera-Hernández, B. (2019). Contexto físico: Clima. En A. Cruz-Angón, J. Cruz-Medina, J. Valero-Padilla, F. P. Rodríguez-Reynaga, E. D. Melgarejo, E. E. Mata-Zayas y D. J. Palma-López (Coords.), *La biodiversidad en Tabasco: Estudio de caso* (Vol. 1, pp. 61-68). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. https://www.researchgate.net/publication/364733507_La_biodiversidad_en_Tabasco_estudio_de_estado_volumen_1
- Assefa, W. W., Eneyew, B. G., & Wondie, A. (2021). The impacts of land-use and land-cover change on wetland ecosystem service values in peri-urban and urban area of Bahir Dar City, Upper Blue Nile Basin, Northwestern Ethiopia. *Ecological Processes*, 10, Article 39. <https://doi.org/10.1186/s13717-021-00310-8>

Cabrera-Pérez, S., Ochoa-Gaona, S., Mariaca-Méndez, R., González-Valdivia, N., Guadarrama-Olivera, M. de los Á., y Gama, L. (2013). Vulnerabilidad por aprovechamiento y distribución de especies leñosas desde la perspectiva comunitaria en la Reserva Cañón del Usumacinta, Tabasco, México. *Polibotánica*, (35), 143-172. <https://www.redalyc.org/pdf/621/62125675009.pdf>

Castellanos-Navarrete, A., de Castro, F., & Pacheco, P. (2021). The impact of oil palm on rural livelihoods and tropical forest landscapes in Latin America. *Journal of Rural Studies*, 81, 294-304. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2020.10.047>

Cortez-Egremy, J. G., Baca-del Moral, J., Uribe-Gómez, M., Gómez-Hernández, T., y Valdés-Velarde, E. (2022). La multifuncionalidad de la agricultura como herramienta de análisis de políticas agrarias: el caso del programa Sembrando Vida en Chahuities, Oaxaca. *Acta Universitaria*, 32, Artículo e3339. <https://doi.org/10.15174/au.2022.3339>

Eastman, J. R. (2024). *TerrSet liberaGIS. Geospatial monitoring and modelling system. Tutorial*. Clark University. <https://s45055.pcdn.co/centers/geospatial-analytics/www-content/blogs.dir/7/files/sites/354/2024/11/TerrSet-liberaGIS-Tutorial.pdf>

Gallardo-Cruz, J. A., Fernández-Montes de Oca, A., y Rives, C. (2019). Detección de amenazas y oportunidades para la conservación en la cuenca baja del Usumacinta a partir de técnicas de percepción remota. *Ecosistemas*, 28(2), 82-99. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1611>

Girma, R., Fürst, C., & Moges, A. (2022). Land use land cover change modeling by integrating artificial neural network with cellular Automata-Markov chain model in Gidabo river basin, main Ethiopian rift. *Environmental Challenges*, 6, Article 100419. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100419>

Gutiérrez-San Pallo, M., Ramos-Muñoz, D. E., Mesa-Jurado, M. A., y Díaz-Perera, M. Á. (2019). Informes de gobierno y paisaje forestal en Tabasco y Chiapas de 1947-

1982. *Entre Diversidades*, 6(2), 233-262.
<https://doi.org/10.31644/ED.V6.N2.2019.A08>

Hernández-Rojas, D. A., López-Barrera, F., y Bonilla-Moheno, M. (2018). Análisis preliminar de la dinámica de uso del suelo asociada al cultivo palma de aceite (*Elaeis guineensis*) en México. *Agrociencia*, 52(6), 875-893.
<https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1711>

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2017). *Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación escala 1:250 000, serie VI*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825092030.pdf

Landgrave, R., y Moreno-Casasola, P. (2012). Evaluación cuantitativa de la pérdida de humedales en México. *Investigación ambiental. Ciencia y Política Pública*, 4(1), 19-35.
<https://biblat.unam.mx/es/revista/investigacion-ambiental-ciencia-y-politica-publica/articulo/evaluacion-cuantitativa-de-la-perdida-de-humedales-en-mexico>

Licon, L. S., y Estupiñan, L. H. (2019). Barbecho como práctica cultural: una revisión histórica y alcances frente a la sostenibilidad. *Revista Luna Azul*, (49), 21-37.
<https://doi.org/10.17151/luaz.2019.49.2>

Manjarrez-Muñoz, B., Hernández-Daumás, S., de Jong, B., Nahed-Toral, J., de Dios-Vallejo, O. O., y Salvatierra-Zaba, E. B. (2007). Configuración territorial y perspectivas de ordenamiento de la ganadería bovina en los municipios de Balancán y Tenosique, Tabasco. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, (64), 90-115.
<https://www.investigacionesgeograficas.unam.mx/index.php/rig/article/view/17968/17109>

Mei, W., Dong, H., Qian, L., Yan, J., Hu, Y., & Wang, L. (2024). Effects of anthropogenic disturbances on the carbon sink function of Yangtze River estuary wetlands: A review of performance, process, and mechanism. *Ecological Indicators*, 159, Article 111643. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111643>

Palacio-Prieto, J. L., Sánchez-Salazar, M. T., Casado-Izquierdo, J. M., Propin-Frejomil, E., Delgado-Campos, J., Velázquez-Montes, A., Chias-Becerril, J., Ortiz-Álvarez, M. I., González-Sánchez, J., Negrete-Fernández, G., Morales, J. G., y Márquez-Huitzil, R. (2004). *Indicadores para la caracterización y ordenamiento del territorio*. Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Desarrollo Social, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología. https://unidadesdepaisaje.unam.mx/sites/default/files/2022-06/Palacio%20et%20al%2C%202004_0.pdf

Palma-López, D. J., Vázquez-Navarrete, C. J., Mata-Zayas, E. E., López-Castañeda, A., Morales-Garduza, M. A., Chablé-Pascual, R., Contreras-Hernández, J., y Palma-Cancino, D. Y. (2011). *Zonificación de ecosistemas y agroecosistemas susceptibles de recibir pagos por servicios ambientales en la Chontalpa, Tabasco*. Gobierno del Estado de Tabasco, Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental, Colegio de Postgraduados Campus Tabasco y Petróleos Mexicano. https://www.researchgate.net/publication/293958292_Zonificacion_de_Ecosistemas_y_Agroecosistemas_Susceptibles_de_Recibir_Pagos_por_Servicios_Ambientales_en_la_Chontalpa_Tabasco

Palomeque-de la Cruz, M. A., Ruiz-Acosta, S. C., Galindo-Alcántara, A., & Ramos-Reyes, R. (2019). Characterization of the bovine livestock in the area protection of flora and fauna Usumacinta canyon, Tenosique, Tabasco, Mexico. *Agroproductividad*, 12(6), 75-81. <https://doi.org/10.32854/agrop.v0i0.1403>

Palomeque-de la Cruz, M. Á., Ruíz-Acosta, S. del C., Núñez-Magaña, T. G., Ramos-Reyes, R., Galindo-Alcántara, A., y Magaña-Alejandro, M. A. (2025). Modelación y

proyección del cambio de uso del suelo en Tenosique, Tabasco, México. *Terra Latinoamericana*, 43, Artículo e1821. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.1821>

Pérez-Vega, A., Regil-García, H. H., y 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), Artículo e60150. <https://doi.org/10.14350/rig.60150>

Pinkus-Rendón, M. J., y Contreras-Sánchez, A. (2012). Impacto socioambiental de la industria petrolera en Tabasco: el caso de la Chontalpa. *LiminaR. Estudios Sociales Y Humanísticos*, 10(2), 122-144. <https://doi.org/10.29043/liminar.v10i2.99>

Principi, N. (2022). Modelado de expansión urbana mediante autómatas celulares y redes neuronales artificiales. *Revista Universitaria de Geografía*, 31(1), 95-113. <https://revistas.uns.edu.ar/rug/article/view/4257>

QGIS Development Team. (2025). *QGIS Geographic Information System* (Version 3.8.3) [Software]. Open Source Geospatial Foundation. <https://qgis.org/>

Ramírez-García, A. R., Zavala-Cruz, J., Rincón-Ramírez, J. A., Guerrero-Peña, A., García-López, E., Sánchez-Hernández, R., Castillo-Acosta, O., Alfaro-Sánchez, G., & Ortiz-Pérez, M. A. (2022). Vegetation cover and land use change (1947-2019) in the region of Los Ríos, Tabasco, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 28(3), 465-481. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.01.001>

Ramos-Reyes, R., Palomeque-de la Cruz, M. Á., y Zavala-Cruz, J. (2021). Impacto de las actividades agropecuarias y petroleras sobre las coberturas naturales del campo petrolero Samaria, Tabasco. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(8), 1429-1443. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i8.2767>

Ramos-Reyes, R., y Palomeque-de la Cruz, M. Á. (2023). Cambio de uso del suelo y escenarios prospectivos en el Estado de Tabasco (México). *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 43(1), 185-209. <https://doi.org/10.5209/aguc.85944>

- Rodríguez-Arias, C., Gómez-Romero, M., Páramo-Pérez, M. E., & Lindig-Cisneros, R. (2018). Ten-year study of vegetation dynamics in wetlands subject to human disturbance in Western Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 89(3), 910-920. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2018.3.1771>
- Rodríguez-Medina, K., Moreno-Casasola, P., y Yañez-Arenas, C. (2017). Efecto de la ganadería y la variación estacional sobre la composición florística y la biomasa vegetal en los humedales de la costa centro oeste del Golfo de México. *Acta Botánica Mexicana*, (119), 79-99. <https://doi.org/10.21829/abm119.2017.1233>
- Rodríguez-Moreno, V. M., Ruíz-Corral, J. A., Medina-García, G., Valenzuela-Solano, C., Ruvalcaba-Mauricio, J. E., y Álvarez-Bravo, A. (2017). Cambios esperados al uso del suelo en México, según escenario de cambio climático A1F1. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (19), 3979-3992. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i19.667>
- Sari, I. L., Weston, C. J., Newnham, G. J., & Volkova, L. (2023). Land cover modelling for tropical forest vulnerability prediction in Kalimantan, Indonesia. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 32, Article 101003. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101003>
- Srisunthon, P., & Chawchai, S. (2020). Land-use changes and the effects of oil palm expansion on a peatland in Southern Thailand. *Frontier in Earth Science*, 8, Article 559868. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.559868>
- Trujillo-Ubaldo, E., Álvarez-López, P. S., Valdovinos-Chávez, V. R., Benítez-Molina, G., y Rodríguez-González, L. O. (2018). Cultivation shifts in forest plantations of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, in Uruapan, Tabasco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(48), 27-45. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i48.130>
- United States Geological Survey. (2019). *EarthExplorer* [Map database]. United States Geological Survey. <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Zavala-Cruz, J., Jiménez-Ramírez, R., Palma-López, D. J., Bautista-Zúñiga, F., y Gavi-Reyes, F. (2016). Paisajes geomorfológicos: base para el levantamiento de suelos en Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 3(8), 161-171. <https://doi.org/10.19136/era.a3n8.643>



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.