



Cambio de uso del suelo y escenarios prospectivos en el Estado de Tabasco (México)

Rodimiro Ramos Reyes¹; Miguel Ángel Palomeque de la Cruz²

Recibido: 3 de marzo del 2022 / Enviado a evaluar: 8 de marzo del 2022 / Aceptado: 24 de enero del 2023

Resumen. Se estudió la evolución de la dinámica espacio temporal en el Estado de Tabasco, en el Sureste de México, mediante Land Change Modeler, y se proyectaron escenarios con Cadenas de Márkov y Autómatas Celulares. Los resultados señalan que durante quince años (2001-2016) se perdieron 76,522 ha de humedales, 18,333 ha de selvas, y 73,591 ha de vegetación secundaria, debido al crecimiento descomunal de 148,129 ha de uso agropecuario, y la expansión de 13,375 ha de zonas urbanas. Además, mediante Cadenas de Markov y Autómatas Celulares (2016-2030), se proyectaron pérdidas de 19,152 ha de humedales, 8,324 ha de selvas, y 10,592 ha de vegetación secundaria. Este escenario demuestra que se mantendrá el incesante crecimiento agropecuario y de zonas urbanas en los próximos años. Este estudio provee información para los modelos de ordenamiento ecológico territorial, debido a que es urgente conservar y restaurar los últimos ecosistemas del sureste de México.

Palabras clave: Humedales; selvas; crecimiento urbano; Land Change Modeler; Cadenas de Markov; Autómatas Celulares.

[en] Change of land use and prospective scenarios in the State of Tabasco (Mexico)

Abstract. The evolution of space-time dynamics in the State of Tabasco, in the Southeast of Mexico, was studied using Land Change Modeler, and scenarios with Markov Chains and Cellular Automata were projected. The results indicate that during fifteen years (2001-2016) 76,522 ha of wetlands, 18,333 ha of forests, and 73,591 ha of secondary vegetation were lost, due to the enormous growth of 148,129 ha of agricultural use, and the expansion of 13,375 ha of areas urban. In addition, through Markov Chains and Cellular Automata (2016-2030), losses of 19,152 ha of wetlands, 8,324 ha of forests, and 10,592 ha of

¹ Departamento de Observación y Estudio de la Tierra, la Atmósfera y el Océano. Grupo Procesos Oceanográficos y Dinámica de Sistemas Acuáticos. Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR). (México). E-mail: rramos@ecosur.mx

² Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica. Cuerpo Académico de Ordenamiento Ecológico y Análisis Socio ambiental. División Académica de Ciencias Biológicas. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (México). E-mail: migueldacbiol@hotmail.com

secondary vegetation were projected. This scenario shows that the incessant growth of agriculture and urban areas will continue in the coming years. This study provides information for models of territorial ecological ordering, because it is urgent to conserve and restore the last ecosystems of southeastern Mexico.

Keywords: Wetlands; jungles; urban growth; Land Change Modeler; Markov Chains; Cellular Automata.

[fr] Changement d'utilisation des terres et scénarios prospectifs dans l'état de tabasco (Mexique)

Résumé. L'évolution de la dynamique spatio-temporelle dans l'État de Tabasco, dans le sud-est du Mexique, a été étudiée à l'aide de Land Change Modeler, et des scénarios avec des chaînes de Markov et des automates cellulaires ont été projetés. Les résultats indiquent que pendant quinze ans (2001-2016) 76 522 ha de zones humides, 18 333 ha de forêts et 73 591 ha de végétation secondaire ont été perdus, en raison de l'énorme croissance de 148 129 ha d'utilisation agricole et de l'expansion de 13 375 ha de zones urbaines. De plus, à travers les chaînes de Markov et les automates cellulaires (2016-2030), des pertes de 19 152 ha de zones humides, 8 324 ha de forêts et 10 592 ha de végétation secondaire ont été projetées. Ce scénario montre que la croissance incessante de l'agriculture et des zones urbaines se poursuivra dans les années à venir. Cette étude fournit des informations pour des modèles d'ordre écologique territorial, car il est urgent de conserver et de restaurer les derniers écosystèmes du sud-est du Mexique.

Mots clés: Zones humides ; jungles; croissance urbaine; Land Change Modeler; chaînes de Markov; automates cellulaires.

Cómo citar. Ramos Reyes, R. y Palomeque de la Cruz, M.A. (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.

Sumario. 1. Introducción. 2. Materiales y Métodos. 2.1. Área de estudio. 2.2. Construcción de la base de datos cartográfica. 2.3. Modelación del cambio de uso del suelo (2001-2016). 2.4. Construcción de las Cadenas de Márkov (2030). 2.5. Proyección espacial con Automatas Celulares (2030). 2.6. Modelación del cambio de uso del suelo (2016-2030). 2.7. Cálculo de las tasas de cambio. 3. Resultados y Discusión. 3.1. Coberturas y uso del suelo 2001. 3.2. Cambio de uso del suelo (2001-2016). 3.3. Principales transiciones (2001-2016). 3.4. Probabilidad de cambio de uso del suelo (2030). 3.5. Cambio de uso del suelo (2016- Proyección 2030). 4. Conclusiones. 5. Referencias bibliográficas.

1. Introducción

En México, los procesos de cambio de uso del suelo influyeron en la deforestación de los bosques tropicales y templados, estos se han incrementado entre los años 60s y en la primera década del 2000 (Ibarra-Montoya et al., 2011). Se ha deteriorado casi el 90.7% de la superficie nacional que era cubierta por ecosistemas terrestres y acuáticos que han sido desplazados por el aumento de la población humana, la extensión de las superficies agropecuarias, la industria, y el crecimiento constante de las ciudades con regular o escasa planificación (CONAFOR, 2013; Ramírez y Pértile, 2017). El estado de Tabasco presenta porciones extensas y climas típicos de las regiones tropicales de México que son zonas biológicamente ricas en el planeta, que cuentan con grupos de ecosistemas naturales ricos, diversos, intrincados y complejos, por sus características agroclimáticas (Palma-López et al., 2011; Palma-López et al., 2007).

Desde mediados de siglo XX, hasta la segunda década del XXI, Tabasco ha sufrido deterioro de sus coberturas originales ante la intervención de los usos pecuarios, agrícolas, agroforestal, industrial y urbano, productos del establecimiento de programas de modernización productiva, social e industrial en las que destacan el Plan Chontalpa, y el Plan Balancán-Tenosique (Gracia y Fuentes, 2004; Pinkus-Rendón y Contreras-Sánchez, 2012). Otro causante de los impactos ambientales en los ecosistemas de Tabasco por el crecimiento poblacional, y la expansión urbana inadecuada fue el auge petrolero en las décadas de los 70s (Allub y Michel, 1979; Capdepon-Ballina & Marín-Olán, 2014). Entre 1940-1996 se perdió el 95 % de selvas de Tabasco debido al incremento del uso agrícola y pecuario como resultados adversos de los Planes Chontalpa y Balancán-Tenosique (Allub y Michel, 1979; Zavala y Castillo, 2007). El Plan Chontalpa de los años 60s no solo provocó el deterioro de los diferentes tipos de selvas, también influyó en el cambio de uso del suelo de las coberturas de lagunas y pantanos (Murillo, 2004). Aproximadamente entre los años 60s y la primera década del siglo XX, las pérdidas de humedales fueron aproximadamente del 50 % (Landgrave y Moreno-Casasola, 2012; Hernández-Melchor et al., 2016). Durante 1950-2000, las coberturas de selva alta perennifolia eran de 538,861 ha en 1950, pero en 1960 la cobertura disminuyó a 453,411 ha, y en 1970 la deforestación cubría una escasa extensión de 146,485 ha, las cuales continuaron reduciendo a 71,387 ha en 1980 y 41,079 en 1990; esta degradación significó que, en 40 años, las selvas pasaron de representar el 21.7% al 1.6% de la superficie estatal (Sánchez-Munguía, 2005). La elevada deforestación y la pérdida de humedales se asoció directamente con el aumento del uso agropecuario al ocupar el 65.7 % del territorio estatal, esto define que en Tabasco las estrategias de hacer producir el campo e incentivar a la ganadería en el siglo XX ha sido a costa de deforestar la selva y otros tipos de vegetación (Gutiérrez-San Pallo et al., 2019).

El estudio del cambio de uso del suelo proporciona la base para conocer las tendencias de los procesos de deforestación, degradación, desertificación y pérdida de la biodiversidad porque es una herramienta indispensable para estimar la distribución del cambio de coberturas naturales y usos artificiales e identificar las coberturas que presentan la mayor presión ambiental (Lambin et al., 2001; Leh & Chaubey, 2011; Paegelow et al., 2003; Velázquez et al., 2002). Los modelos geomáticos para el análisis espacio temporal, generan mayor certeza y precisión en estudios del territorio. Por ejemplo, Land Change Modeler (LCM) for Ecological Sustainability, simplifica las complejidades del análisis de cambio de uso del suelo, y utiliza el cambio histórico de la cobertura para modelar empíricamente la relación entre las transiciones de la cubierta terrestre (Camacho-Olmedo et al., 2013; Eastman, 2012; Eastman y Toledano, 2018).

Las Cadenas de Márkov simulan la predicción del estado de un sistema en un tiempo determinado a partir de dos estados precedentes (Eastman, 2012). Es un procedimiento discreto en un tiempo discreto, en donde el valor en el tiempo t_1 depende de los valores en los tiempos t_0 y t_1 . La predicción se materializa en una serie de mapas de usos del suelo para un tiempo futuro, en donde el nivel digital de cada píxel expresa la probabilidad de pertenecer a la categoría analizada (Eastman,

2012; Reynoso-Santos et al., 2016). Los Automatas Celulares funcionan como un conjunto de elementos idénticos, llamado células, cada una de las cuales se encuentra en un espacio discreto (Clarke y Gaydos, 1998; Reynoso et al., 2016). Dichas unidades espaciales contienen una historia y una evolución de cambio en el tiempo, además de reglas como la influencia de celdas colindantes a una celda central (Clarke & Gaydos, 1998; Liping et al., 2018). Es primordial analizar cartográfica y cuantitativamente la dinámica de los ecosistemas de Tabasco, para ello, el Instituto Nacional de Geografía e Informática tiene en su base de datos: "Información geoespacial de Interés Nacional que muestra la distribución del uso del suelo agrícola, de la vegetación natural e inducida del país, además indica el uso pecuario y forestal y otros usos que se presentan en el territorio relacionados con la cubierta vegetal, en la que destacan los archivos vectoriales de vegetación y usos del suelo escala 1:250,000" (INEGI, 2022)³. Los mapas de uso del suelo y vegetación a escala 1:250,000, son empleados para el análisis de los cambios espacios temporales, además, son importantes para definir áreas prioritarias de focalización de intervenciones de políticas públicas, en función de los niveles de perturbación de las coberturas terrestres (Paz-Pellat y de la Cruz-Cabrera, 2019). El objetivo de este trabajo fue conocer la evolución de la dinámica espacio temporal en el estado de Tabasco, ubicado en el Sureste de México. Para ello, se empleó la combinación de los modeladores geomáticos Land Change Modeler (2001-2016), y se proyectaron escenarios prospectivos con Cadenas de Márkov y Automatas Celulares (2030 y 2040). Este estudio provee información actualizada del cambio de uso del suelo sobre los ecosistemas del estado de Tabasco, para un nuevo modelo de ordenamiento ecológico territorial, debido a que es urgente conservar y restaurar los últimos ecosistemas de México.

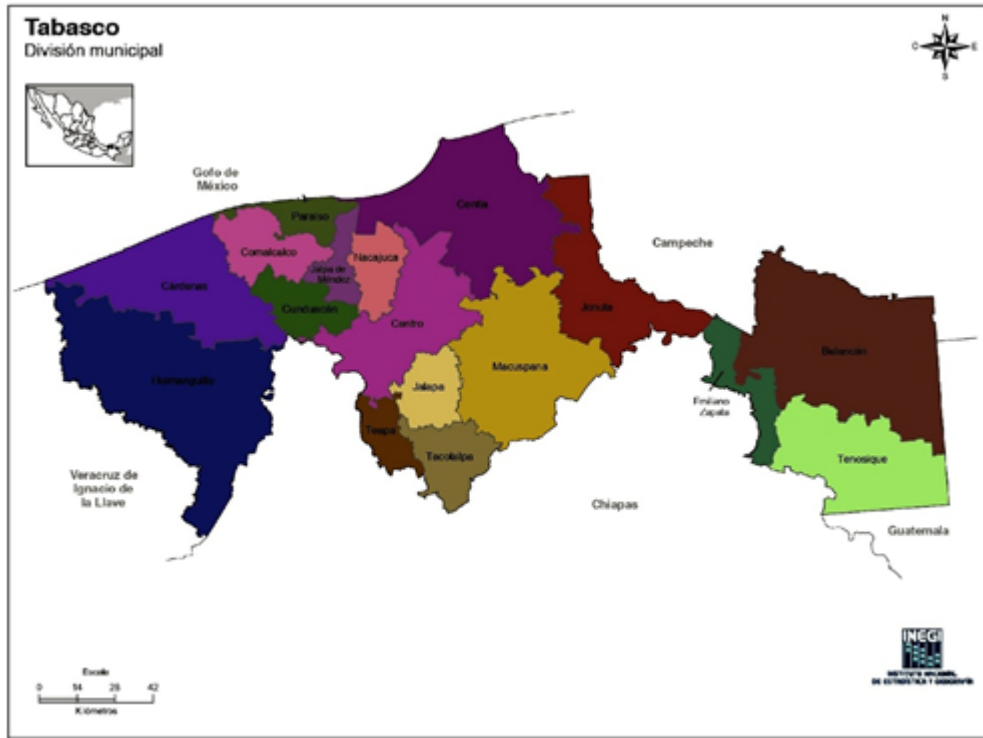
2. Materiales y Métodos

2.1. Área de estudio

El estado de Tabasco se ubica en el Sureste de México (Figura 1), tiene una superficie de 24,661 km² que representa el 1.3% de la superficie del país, el territorio está dividido políticamente por 17 municipios, y cuatro subregiones, su capital es la ciudad de Villahermosa (INAFED, 2010). Colinda con al norte con el Golfo de México y Campeche; al este con Campeche y la República de Guatemala; al sur con Chiapas; al oeste con Veracruz de Ignacio de la Llave (INEGI, 2015). Sus coordenadas geográficas extremas son al norte 18°39'03", al sur 17°15'03" de latitud norte; al este 90°59'15", al oeste 94°07'48" de longitud oeste (INEGI, 2015).

³ Esta información está disponible en <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/>

Figura 1. Ubicación geográfica del estado de Tabasco en el Sureste de México



Fuente: INEGI (2010). Marco Geoestadístico Municipal, versión 5.0

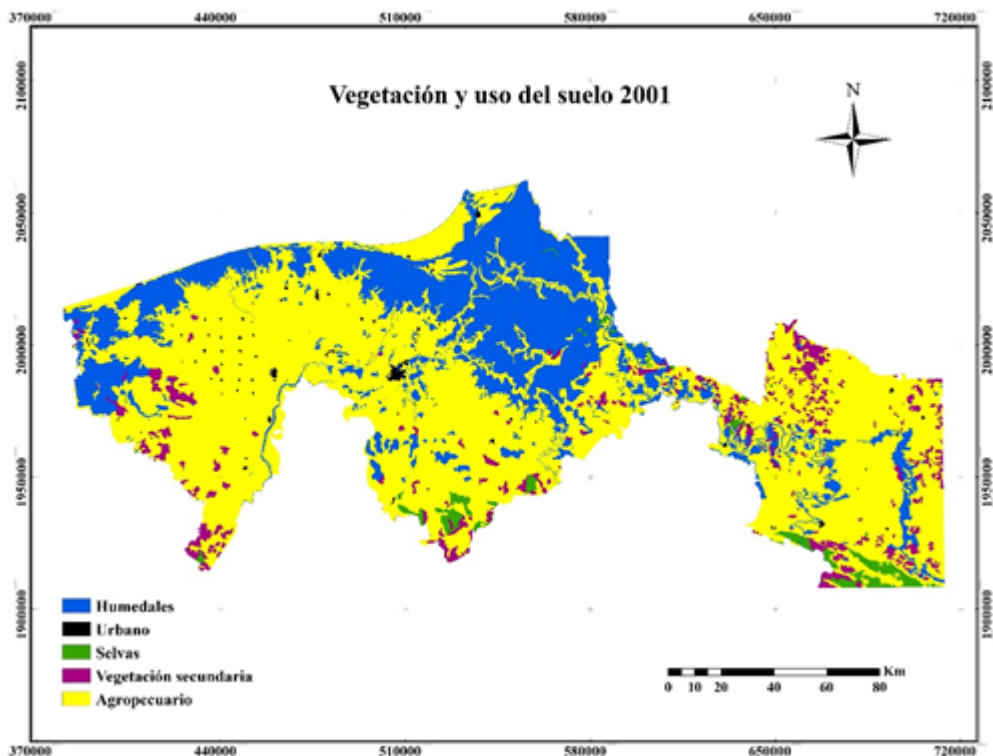
La fisiografía estatal está representada por la llanura costera del Golfo Sur (llanura y Pantanos Tabasqueños), y por las Sierras de Chiapas y Guatemala (Sierras de Norte de Chiapas, y Sierras Bajas de Petén). Los tipos de clima están divididos en cálido húmedo con lluvias todo el año Af, cálido húmedo con abundantes lluvias en verano Am, y Cálido subhúmedo con lluvias en veranos A (w) (INEGI, 2015). En Tabasco, los ecosistemas más representativos son el pastizal, la selva alta perennifolia, grandes superficies de humedales con dominio de popales, manglares y tulares. También existe dominio de la sabana, y superficies agrícolas (INEGI, 2015).

2.2. Construcción de la base de datos cartográfica

Se descargaron dos shapefile con la temática de vegetación y usos del suelo escala 1:250,000 (continuo nacional), correspondientes a 2001 (serie I), y 2016 (serie VI). Los shapefile fueron obtenidos en el catálogo de metadatos geográficos de INEGI con el sistema de referencia de coordenadas geográficas UTM Zona 15N con los parámetros de DATUM WGS84. Los shapefile fueron transformados a formato ráster, con un tamaño de 30 metros por píxel, 1667 píxeles columnas y 771 píxeles

por renglones, con el comando RASTERVECTOR del software IDRISI TerrSet®. Esta conversión de shapefile a píxeles facilita que los modelos de análisis espacial programa IDRISI TerrSet® puedan ejecutarse con mayor rapidez sin afectar los valores espaciales obtenidos en los shapefile.

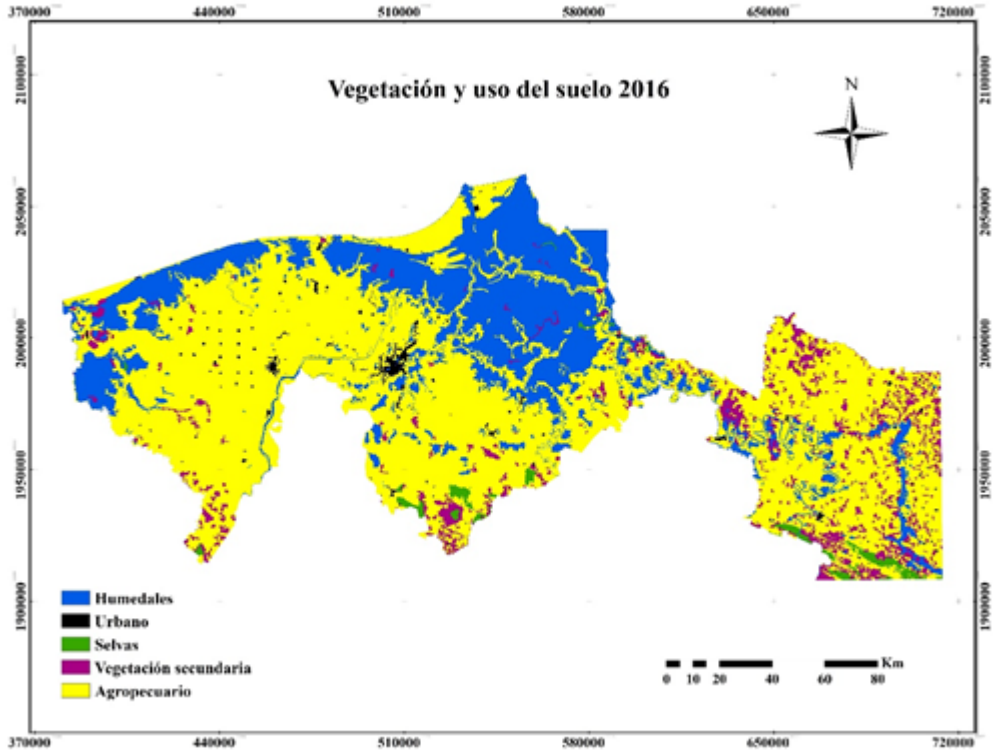
Figura 2. Mapa de vegetación y uso del suelo (2001) en el estado de Tabasco.



Fuente: Elaboración propia.

La metodología de clasificación de las categorías de vegetación y uso del suelo de INEGI no fue equivalente en los dos periodos de tiempo. Para unificar la metodología de clasificación de los raster 2001 (Figura 2) y 2016 (Figura 3), se llevó a cabo la reclasificación con el comando RECLASS del software IDRISI TerrSet® con las siguientes categorías: humedales, urbano, selvas, vegetación secundaria y agropecuario, esto que permitió asegurar que el cruce de tablas fuera equivalente en el orden de las categorías para su comparación. Posteriormente, los dos archivos raster fueron transformados a formato TIFF para facilitar la exportación de los dos archivos al programa IDRISI TerrSet® empleando el comando GeoTIFF/Tiff to Idrisi.

Figura 3. Mapa de vegetación y uso del suelo (2016) en el estado de Tabasco.



Fuente: Elaboración propia.

2.3. Modelación del cambio de uso del suelo (2001-2016)

Para realizar el análisis espacio temporal se utilizó el módulo Land Change Modeler for ecological sustainability integrado en el software IDRISI TerrSet® y desarrollado como una aplicación orientada al estudio del cambio de la cobertura y uso del suelo (Eastman, 2012). Este módulo es apoyado con la generación de una matriz de tabulación cruzada con el comando CROSSTAB del mismo software. Este análisis varía en el número de fechas de colecta; es decir, en más de dos periodos (Pineda-Jaimes et al., 2009; Pontius et al., 2004).

Con Land Change Modeler el cruce de las imágenes de coberturas y uso de suelo de 1997 (Figura 2) y 2016 (Figura 3), generó una matriz con un estadístico Kappa= 0.8996. Este estadístico cercano a 1.000 es confiable para el análisis de la dinámica del territorio en los dos periodos de tiempo (Eastman, 2012). Los resultados incluyeron el resumen de las matrices de tabulación cruzada que muestra la superficie

de cada categoría, en la comparación con otras, en términos de ganancias, pérdidas, cambios netos y transiciones.

2.4. Construcción de las Cadenas de Márkov (2030)

La matriz de probabilidad de transición se calculó mediante Cadenas de Márkov empleando el módulo MARKOV del software IDRISI TerrSet®. El método consiste en cruzar dos periodos de tiempo y simular un tercer periodo en el futuro. El módulo utiliza un error proporcional de 00. La Cadena de Markov (2030) se construyó cruzando las imágenes de uso del suelo de 2001 y la imagen de uso del suelo del 2016, con una proyección a (2030). Los resultados fueron una matriz de transición que explica las probabilidades de cambio de uso del suelo (2030), una matriz de áreas de transición en píxeles (2030), y un grupo ráster (2030) de las cinco categorías que enumera todas las imágenes de probabilidad condicionales.

2.5. Proyección espacial con Autómatas Celulares (2030)

Se emplearon los Autómatas Celulares, mediante el uso del módulo CA-MARKOV del software IDRISI TerrSet®, para simular un escenario de uso del suelo (2030). La predicción fue construida a partir de la imagen de uso del suelo (2016), la matriz de probabilidad de transición (2030) y la colección de imágenes de áreas de transición (2030). Para validar la precisión de la proyección (2030), se empleó el comando VALIDATE. Este comando 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, 2012; Kamusoko et al., 2009; Wang et al., 2012). De esta forma, se utilizó la imagen base del uso del suelo de 2018 contra la proyección 2030, el resultado de esta validación fue una precisión global Kappa= (Kno= 0.95%, Klocation= 0.99%, Kstandard= 0.94%). Estos estadísticos sustentan, que la proyección 2030 es confiable para representar un escenario espacial del cambio de uso del suelo.

2.6. Modelación del cambio de uso del suelo (2016-2030)

El mapa de uso del suelo 2016 y la proyección 2030 fueron cruzados con el módulo Land Change Modeler y CROSSTAB, para obtener una matriz de probabilidades de cambio validada. Se generó una matriz con un estadístico Kappa= 0.9859. Este estadístico cercano a 1.000 es confiable para el análisis de la dinámica del territorio; de este modo se calcularon los cambios netos, las pérdidas, ganancias, y los cambios netos durante 2016 y 2030.

2.7. Cálculo de las tasas de cambio

Las tasas de cambio de uso del suelo para los dos periodos de estudio fueron calculadas mediante la fórmula: $Td = [(S2 / S1) (1 / n) - 1] * 100$, donde: Td = Tasa de

cambio anual (%), $S1 = \text{Área cubierta al inicio del periodo (ha)}$, $S2 = \text{Área cubierta al final del periodo (ha)}$, y $n = \text{Número de años del periodo}$ (Palacio-Prieto et al., 2004).

3. Resultados y Discusión

3.1. Coberturas y uso del suelo 2001

Durante el año 2001, el 27.1% del territorio de Tabasco (Tabla 2), estaba ocupado por coberturas de humedales (Figura 2) en los que destacan los palustres, estos resguardan una gran diversidad biológica, representada por más de 600 plantas y varios grupos de fauna, distribuidos en nueve tipos de vegetación. También destacan los sistemas hidrológicos formados por los ríos Grijalva y Usumacinta (Estrada-Loreto, 2012; López-Jiménez, 2019). Resalta la importancia de la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla (RBPC) como sistema representativo constituido como una Área Natural Protegida en México y como sitio de importancia internacional por la Comisión Ramsar de Humedales (Barba-Macías et al., 2006).

Tabla 2. Cuantificación del cambio de uso del suelo en el estado de Tabasco (2001-2016).

Categorías	2001	%	2016	%	Perdidas	Ganancias	Cambio neto	Tasa de cambio
Humedales	669484	27.1	645308	26.1	-76522	52316	-24206	-0.2
Urbano	12276	0.5	25140	1	-454	13375	12921	4.9
Selvas	43804	1.8	29828	1.2	-18333	4580	-13753	-2.5
Vegetación secundaria	122940	5	155440	6.3	-73591	106572	32981	1.6
Agropecuario	1623064	65.7	1615852	65.4	-148129	140186	-7943	0

Fuente: Elaboración propia.

Las selvas ocupaban el 1.8% del territorio estatal, mientras que a la vegetación secundaria le correspondía el 5.0% (Tabla 2). La vegetación selvática de Tabasco es de gran relevancia florística y principalmente se distribuye en la región sierra, ocupa los municipios de Huimanguillo, Teapa, Tacotalpa, Macuspana y Tenosique, son ecosistemas altamente diversos y eficientes con complejidad en sus formas de vida vegetal en las que sobresalen las especies arbóreas, varias amenazadas o en vías de extinción (Castillo y Zavala, 1996; Pérez et al., 2005; Maldonado-Sánchez et al., 2010; Sánchez-Pérez et al., 2011; Vázquez-Negrín et al., 2011).

En la parte sureste (Figura 2) se aprecia la cobertura selvática del Área de Protección de Flora y Fauna “Cañón del Usumacinta”, que cuenta con características bióticas únicas siendo la puerta de entrada al Petén guatemalteco y al Corredor Biológico Mesoamericano, que se extiende desde México hasta Centroamérica, siendo el segundo macizo de selvas tropicales más extenso después de la Amazonía (Arriaga-Cabrera et al., 2000; DOF, 2008; Hernández-López et al., 2013). Este

ecosistema está cubierto de selva alta perennifolia, la vegetación más exuberante y la más rica de todas las comunidades vegetales (Rzedowski y Huerta, 1994). Las especies representativas son el chicozapote (*Manilkara zapota*), zapote (*Pouteria sapota*), ramón (*Brosimum alicastrum*), guapaque (*Dialium guianense*) y canxán (*Terminalia amazonia*) (DOF, 2008).

En las zonas inundables de agua salobre predominan los manglares, y en agua dulce crece vegetación acuática con dominancia de popales o tulares, en terrenos donde existe mal drenaje (Barba-Macías et al., 2006). Otro tipo de uso es de relictos de sabana, donde predominan las herbáceas y gramíneas, abunda en las llanuras al sur del estado, la sabana también ha disminuido por las actividades agropecuarias (Moreno-Cáliz et al., 2002; Guerra Martínez y Ochoa Gaona, 2006; Domínguez-Domínguez et al., 2011).

Como se observa en el mapa del 2001 (figura 2), el uso agropecuario representaba la mayor parte de la cobertura estatal con el 65.7% (Tabla 2). Este se desarrolló durante gran parte del siglo XX, principalmente entre 1950 a 1980 con el impulso de la ganadería extensiva para abastecer al mercado nacional mediante el Plan Piloto Limón ampliándose como el Plan Chontalpa (1965-1976), el Programa de Desarrollo Rural Integrado para el Trópico Húmedo y Plan Balancán-Tenosique (Capdepon-Ballina & Marín-Olán, 2014; Sánchez-Munguía, 2005; Zavala et al., 2009), estos programas provocaron aceleradas tasas de deforestación por cambio de uso de suelo, construcción de infraestructura hidráulica y el desarrollo de nuevas áreas urbanas (Capdepon-Ballina y Marín-Olán, 2014; Sánchez-Munguía, 2005; Zavala et al., 2009; Pinkus-Rendón y Contreras-Sánchez, 2012).

Las zonas urbanas distribuidas entre los siete municipios de Tabasco y la ciudad de Villahermosa, también áreas dedicadas a la industria y servicios ocupaban el 0.5% del territorio (Tabla 2). La acción del crecimiento urbano es permanente y deberá ser considerando las recomendaciones de las autoridades municipales y estatales, además apegado a los ordenamientos y atlas de riesgos actuales.

3.2. Cambio de uso del suelo (2001-2016)

El análisis espacio temporal 2001-2016, determinó que los humedales presentaron pérdidas de 76,522 ha, ocupando el 26.1% del territorio y presentaron una tasa de cambio anual negativa de 0.2% (Tabla 2), siendo menor a los registrado por Palomeque-de la Cruz et al., (2017) en el periodo 2000-2008 en la Región Centro de Tabasco, debido a que se registró una tasa de 1.13% anual. A pesar de que los humedales son primordiales por ser reguladores ambientales, sitios de amortiguamiento ante inundaciones, ecosistemas que albergan alta biodiversidad y hábitat para especies residentes y migratorias (Henny y Meta, 2014; Hettiarachchi et al., 2014), en la primera década del siglo XXI en el territorio de Tabasco, las pérdidas de superficies de lagunas urbanas, costeras y zonas de pantanos se relacionaron con la agricultura, construcción de carreteras, actividades pecuarias, la infraestructura petrolera y el uso insostenible del agua por la industria y zonas residenciales (Carrera y de la Fuente 2003; Zedler y Kercher, 2005). Las presiones antropogénicas sobre las

coberturas de humedales no ceden y están alterando procesos ecológicos en gran parte de los ecosistemas de Tabasco (Agardy et al., 2005; Hernández-Melchor et al., 2016).

Otro impacto ambiental sobresaliente fue la pérdida de 18,333 ha de la selva, esta cobertura ocupó el 1.2% del territorio estatal, y presentó una tasa negativa de cambio de 2.5% (Tabla 2), siendo muy elevada en comparación a los detectado en la cuenca Grijalva-Usumacinta (Tasa de cambio negativa de 0.9%) (Kolb y Galicia, 2012), y en gran parte del territorio mexicano (-0.3%) (FAO, 2015). La deforestación de la selva alta perennifolia, principalmente para establecer cultivos de maíz (*Zea mays*) constituye la fuente de alimentación principal de los pobladores, y se ubican en áreas con menos pendientes, con diversas edades (Galindo-Alcántara et al., 2006; Mifsut y Castro, 2010; Velasco-Tapia, 2010). La pérdida de la selva en gran parte de la década del 2000 también puede relacionarse con el insostenible impulso de programas de fomento ganadero bovino, como PROGAN en los años 2003, 2004 y 2005 apoyó a 2,126 proyectos en los municipios de Balancán y Tenosique, dando mayor apertura a zonas ganaderas en estos municipios tabasqueños (Manjarrez et al., 2007; Salas-González et al., 2013; Alejandro-Montiel et al., 2016).

Paralelo a la pérdida de la cobertura vegetal original, también se detectó un gran aumento de 106,572 ha de la vegetación secundaria, con una tasa de aumento de 1.6% anual y ocupó el 6.3% del territorio (Tabla 2). Merece mención que el uso agropecuario presentó una disminución de su superficie de forma muy elevada y ocupó el 65.4% del estado como consecuencia de la reversión de las coberturas arbóreas. La reversión de la vegetación arbórea puede relacionarse con la proliferación de programas para la restauración de la selva como PRODEFOR, que ha beneficiado diversos proyectos de reforestación durante 2004 y 2005, principalmente con plantaciones de Eucalipto y hule una estrategia de reforestar y obtener beneficios para el futuro (Manjarrez-Muñoz et al., 2007).

El uso urbano presentó un crecimiento de 13,375 ha, con una tasa de aumento de 4.9% y una ocupación del 1.0% del territorio estatal (Tabla 2). Como se observa en la tasa de cambio, las zonas urbanas de Tabasco tuvieron un aumento acelerado, aproximadamente en las últimas tres décadas, debido al auge de los programas urbanos y periurbanos de viviendas de interés social (Lara-Pulido et al., 2017; Couturier et al., 2020). En México la población total urbana se duplicó entre la década de los 1980 y 2010, mientras que el crecimiento de las ciudades se incrementó en promedio 10 veces (IMEPLAN, 2016).

Las zonas urbanas de Tabasco han mostrado un crecimiento asociado a la industrialización, principalmente por la actividad petrolera que a su vez conduce a movimientos de población, existe una notable demanda de productos agrícolas que aumenta su industrialización, la creación de universidades, centros comerciales, y áreas de entretenimiento también fomenta la expansión urbana. El entorno político da total control al sector inmobiliario por lo que cada vez es más la construcción de fraccionamientos (Palomeque-de la Cruz et al., 2017). El crecimiento de las zonas urbanas de Tabasco ha proliferado mediante un crecimiento laberíntico hacia desembocaduras de los diferentes ríos, y crecimiento urbano paralelo al trayecto de las carreteras con intensificación de las conurbaciones lineales, estos procesos son

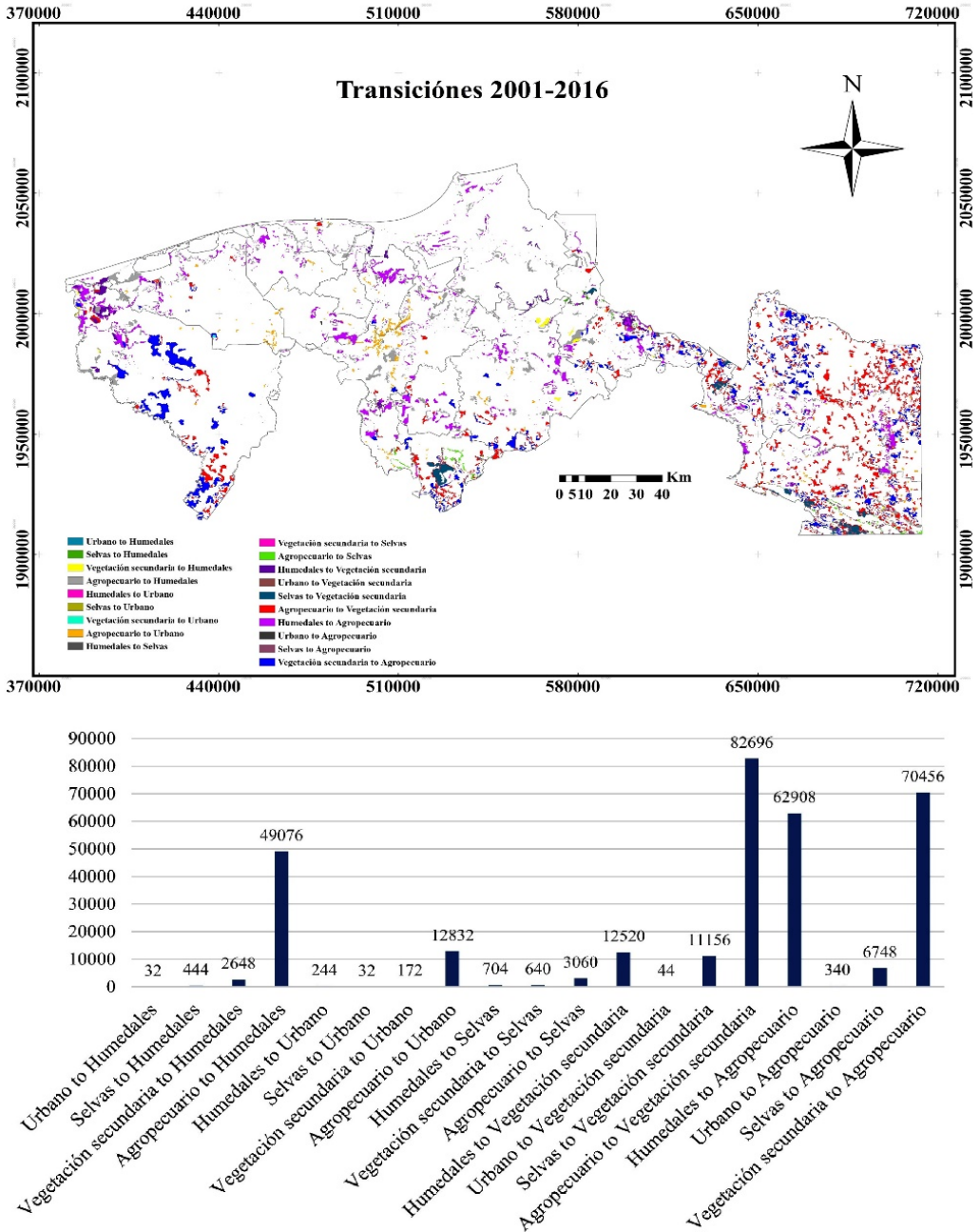
factores explicativos comunes del crecimiento urbano en ciudades de Latinoamérica y tiene una influencia positiva en el crecimiento económico regional (Pérez-Bustamante y Salinas-Varela, 2007; Zepeda-Ortega et al., 2019).

Los efectos ambientales adversos del cambio de uso del suelo en gran parte del territorio de Tabasco, ha sido producto de décadas de la acción del hombre sobre la cuenca del río Grijalva se han manifestado en diversos años, por ejemplo, en 2007 ocurrieron colosales eventos de inundación a finales de octubre y principios de noviembre, estas crecientes cubrieron el 62% de Tabasco. Se tiene registro de alteraciones en 1,500 localidades y se afectó al 75% de la población, se dañaron 570 mil hectáreas y 123 mil viviendas Tabasqueñas (Perevochtchikova y Lezama, 2010; Comisión Económica para América Latina, 2008). Las pérdidas por las inundaciones del 2007 y 2008 fueron equivalentes al 33.3% del PIB estatal (Comisión Económica para América Latina, 2008). Ante los estragos mencionados, Díaz-Perera (2014) sugirió que se detuviera la expansión urbana en la zona de influencia del río de la Sierra, ya que es un área de amortiguamiento de humedales y escurrimientos extraordinarios. Las inconsistencias sociales y ambientales continuaron, ya que para atender a la población más afectada por las inundaciones el gobierno del estado construyó fraccionamientos para su reubicación en áreas de humedales y vegetación arbórea (Cerna et al., 2012; Hernández, 2011).

3.3. Principales transiciones (2001-2016)

La dinámica espacial de Tabasco también se determinó con la detección cartográfica y cuantitativa de las transiciones (2001-2016). Se encontró que la transición más sobresaliente fue la conversión de 82,696 ha de uso agropecuario a coberturas de vegetación secundaria (Figura 4). Otra transición notable fue la reversión de la vegetación secundaria en la zona Sureste donde se ubica el Municipio de Tenosique, específicamente en el Área Protegida “Cañón del Usumacinta”, la disminución de sus tasas de cambio se relaciona con la recategorización del Cañón del Usumacinta como Área de Protección de Flora y Fauna (DOF, 2008). Con esta categoría, se redoblaron los esfuerzos para la elaboración del programa de manejo y de ordenamiento territorial (Manjarrez-Muñoz et al., 2007). La reversión de las coberturas de vegetación secundaria, también se relaciona con menores índices de deforestación durante 1997-2016 en la cuenca baja del Usumacinta, en comparación con la región media y alta, por ser territorio donde existen Áreas Naturales Protegidas, por ejemplo, Pantanos de Centla, el Cañón del Usumacinta y Montes Azules (Gallardo-Cruz et al., 2019), aunque no es garantía, pues igual está demostrado que los cambios se dan tanto dentro y fuera de zonas protegidas (De la Rosa-Velázquez et al., 2016).

Figura 4. Principales transiciones (2001-2016).



Fuente: Elaboración propia.

Esto coincide con estudios de Isaac-Márquez et al., (2008) quienes mencionan la urgencia por contrarrestar los efectos que el cambio climático ha originado el desarrollo de un mercado global de servicios ambientales de captura de carbono que ha beneficiado a zonas rurales de Latino América, una de ellas fue el programa del gobierno federal de México llamado Pro Árbol que durante 2006-2018 integró la recuperación y la conservación de los bosques tropicales, la restauración de los servicios ecosistémicos, la activación de proyectos ecoturísticos y el combate a la pobreza. Alejandro-Montiel et al., (2010) señala que en Tabasco se crearon y fortalecieron programas forestales federales el Programa Nacional de Reforestación (PRONARE), el Programa Nacional de Reforestación (PRONARE) y el Programa Estatal de Reforestación (PROERE) durante 2000-2006.

Se espera que el actual programa Sembrando Vida, por ser un programa federal donde hay destinada 150,000 ha e involucrado todo el estado de Tabasco, mitigue los efectos negativos que se han venido dando, siendo beneficiado tanto el sembrador como el ambiente, evitándose la erosión de los suelos y disminuyendo los efectos del cambio climático. Sin embargo, todavía existen debilidades en la programación y ejecución tanto de los programas federales como estatales de restauración, como consecuencia de escasez de estudios previos del terreno para determinar el grado de afectación ambiental, y la falta de un acuerdo común entre las autoridades de los tres niveles de gobierno y las comunidades cercanas a las zonas de reserva (Hernández-Melchor et al., 2016).

Otras transiciones sobresalientes fueron la deforestación de 70,456 ha de vegetación secundaria para su transformación a uso agropecuario (Figura 4). La deforestación coincide con estudios de cambio de uso del suelo en la región donde se demuestra el remplazo de la selva por coberturas agropecuarias (Kolb & Galicia, 2013; Perevochtchikova y Lezama, 2010; Sánchez-Munguía, 2005; Zavala y Castillo, 2007; Zavala et al., 2009). También se cuantifica un marcado remplazo de 62,908 ha de coberturas de humedales a uso agropecuario (Figura 4). En Tabasco, el pastizal de uso pecuario crece fundamentalmente sobre coberturas selváticas y humedales, esta dinámica determina irreversiblemente que el mayor impacto sobre los ecosistemas ha sido dominado por el crecimiento de las actividades agropecuarias en las últimas cuatro décadas, la cual fueron marcadas por planes y decisiones políticas que desconocían la funcionalidad de los ecosistemas del trópico húmedo (Palomeque-de la Cruz et al., 2017).

A pesar de las transformaciones adversas, también pudo detectarse el cambio de 49,076 ha de uso agropecuario a humedales, principalmente aledaño o en frontera con la ganadería en zonas bajas de la planicie tabasqueña y cercana a la costa, esto es igual siguiendo la naturaleza de zonas bajas y tipos de suelos sujetos a inundación (Figura 4).

Sobresale el cambio de 12,832 ha de uso agropecuario a urbano (Figura 4) debido a que el crecimiento de la población demandara más espacio para su ocupación, es algo relativamente esperable, porque el crecimiento demográfico siempre va en aumento y con ello, siempre se va a estar buscando espacios para construir viviendas, aunque deben ser con todas las necesidades y adaptadas al trópico mexicano.

3.4. Probabilidad de cambio de uso del suelo (2030)

La matriz de probabilidad de cambio (2030) ejecutada con Cadenas de Márkov indicó que, si continúan las prácticas de manejo del suelo actual, los humedales (probabilidad 0.09) continuarán transformándose a uso agropecuario, mientras que las selvas tendrán las mayores probabilidades de deterioro para su transformación a vegetación secundaria (0.25), y uso agropecuario (0.90) (Tabla 3).

Tabla 3. Matriz de probabilidad de cambio MARKOV (2030).

Categorías	Humedales	Urbano	Selvas	Vegetación secundaria	Agropecuario
Humedales	0.8859	0.0004	0.0011	0.0187	0.0940
Urbano	0.0026	0.9661	0.0000	0.0036	0.0277
Selvas	0.0101	0.0007	0.5804	0.2547	0.1540
Vegetación secundaria	0.0215	0.0014	0.0052	0.3988	0.5731
Agropecuario	0.0302	0.0079	0.0019	0.0510	0.9090

Fuente: Elaboración propia.

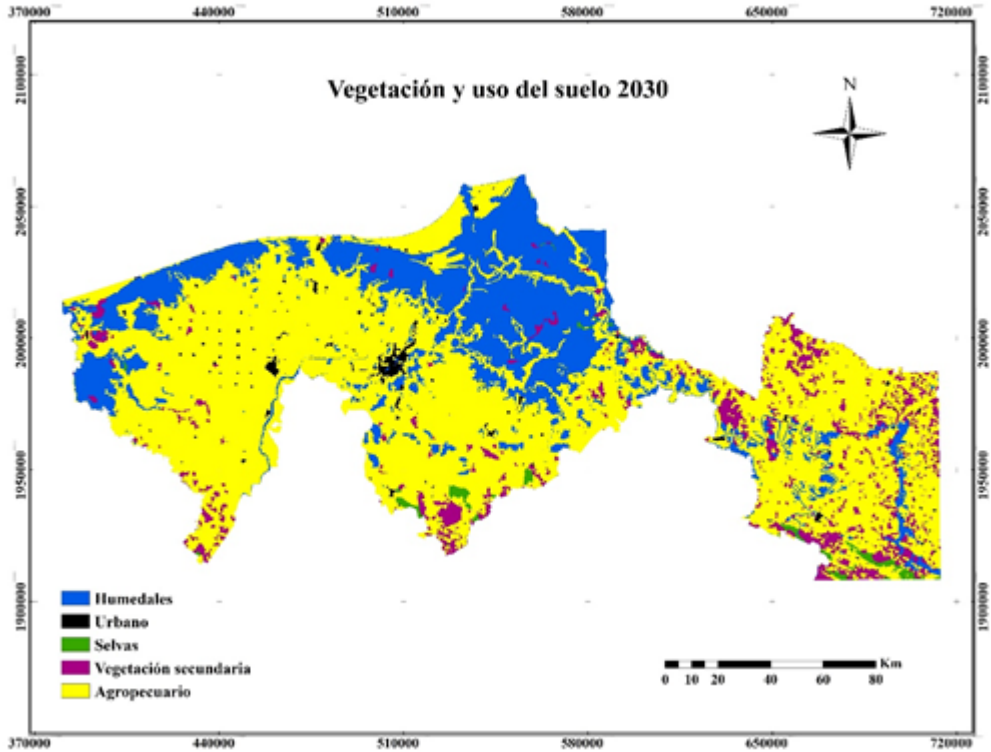
Por otra parte, la vegetación secundaria en sus diferentes etapas de crecimiento tendrá las más altas probabilidades (0.57) de ser remplazadas por uso agropecuario (Tabla 3). Estos resultados se visualizan espacialmente con la proyección (2030) producto del modelo CA-Markov (Figura 5).

3.5. Cambio de uso del suelo (2016- Proyección 2030)

El análisis espacial entre el mapa de uso del suelo (2016) y la proyección (2030), detectó pérdidas 19,152 ha de humedales que representaron el 25.3% del territorio estatal y una tasa de cambio negativa de 0.3% (Tabla 4). Otro impacto ambiental sobresaliente fue la deforestación de 8,324 ha de selvas en sus diferentes tipos y ocuparon tan solo el 0.9%, y además presentaron una tasa de cambio negativa de 2.7% (Tabla 4). A raíz de esto, la vegetación secundaria continuó su ascenso al ganar 19,120 ha, ocupando 6.6% (Tabla 4).

Entre las actividades antropogénicas practicadas, se detectó que la superficie dedicada al uso agropecuario aumentó 22,764 ha, con una tasa de aumento de 1.7%, posicionándose como el 66.0% de todo el territorio estatal (Tabla 4). Esto refleja que las pérdidas de ecosistemas con mayor biodiversidad continuarán en la próxima década, porque las actividades económicas y de subsistencia más importantes seguirán condicionando la dinámica de los cambios de uso y cobertura del suelo en las regiones tropicales (Damián et al., 2018).

Figura 5. Mapa de vegetación y uso del suelo (2030) en el estado de Tabasco.



Fuente: Elaboración propia.

Todas las áreas urbanas de Tabasco, principalmente la zona metropolitana de la Ciudad de Villahermosa, siguieron su ascenso a 1.1%, debido a que presentaron expansión de 2,508 ha de la mancha urbana y una tasa de aumento de 5.3% (Tabla 4). Este crecimiento continuará en zonas no aptas para el desarrollo urbano, debido a que se ubicarán en zonas bajas e inundables que serán vulnerable a futuros eventos de inundación en Tabasco como los registrados en 2007 y recientemente en 2020, esto es debidos a que en Tabasco el crecimiento de la población conlleva al establecimiento de asentamientos irregulares y la construcción de fraccionamientos en superficies propensas a problemas muy grandes de inundación, lo cual es parte de la vulnerabilidad heredada al cambio climático (Ramos-Reyes et al., 2016).

Tabla 4. Cuantificación del cambio de uso del suelo en el estado de Tabasco (2016-2030).

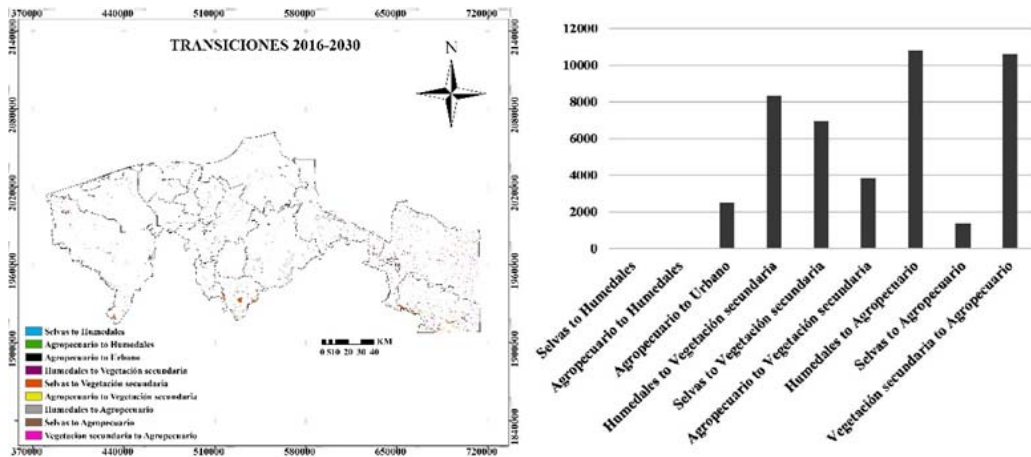
Categorías	2016	%	2030	%	Perdidas	Ganancias
Humedales	645,308	26.1	626,192	25.3	19,152	36
Urbano	25,140	1.0	27,648	1.1	0	2,508
Selvas	29,828	1.2	21,504	0.9	8,324	0
Vegetación secundaria	155,440	6.3	163,968	6.6	10,592	19,120
Agropecuario	1,615,852	65.4	1,632,256	66.0	6,360	22,764

Fuente: Elaboración propia.

Con relación a las transiciones 2016-2030, se cuantificó que la dinámica espacio temporal continuara bajo el dominio de las actividades agropecuarias para la economía regional y para la subsistencia, mientras que el crecimiento de las zonas urbanas, principalmente las zonas metropolitanas de la ciudad de Villahermosa continuarán en ascenso ante sus costos ambientales, económicos y sociales. Las principales transiciones fueron el remplazo de 10,812 ha de coberturas de humedales y 10,592 ha vegetación secundaria por uso agropecuario (Figura 6).

Otra transición sobresaliente fue la ocupación de 2,508 ha de superficies agropecuaria para el crecimiento del área urbana (Figura 6). Esta transición pone en evidencia el ciclo de transformaciones de los ecosistemas terrestres y acuáticos a establecimiento del pastizal para actividades económicos y su destino a urbanización, proceso que difícilmente podría detenerse.

Figura 6. Transiciones (2016-2030) en el estado de Tabasco.



Fuente: Elaboración propia.

Una de las estrategias más notables para conservar y restaurar los espacios naturales del territorio estatal ha sido el Programa de Ordenamiento Ecológico del estado de Tabasco 2006 (POEET) (Galindo-Alcántara et al., 2006b). Este primer programa, tenía como uno de sus objetivos “Orientar y evaluar los asentamientos humanos y la conservación de los recursos naturales, regulando y disminuyendo los impactos ambientales”. Sin embargo, las colosales inundaciones del 2007 propusieron la actualización de un nuevo modelo de ordenamiento de SERNAPAM, 2012, 2017, que incluyera escenarios con eventos hidrometeorológicos extremos relacionados con los efectos del cambio climático global (Gama-Campillo et al., 2018).

En 2019 se inició los trámites para la elaboración del Programa de Ordenamiento Ecológico Regional del Estado de Tabasco (POERET), para generar un modelo de ordenamiento territorial que atienda las nuevas necesidades de la población y al mismo tiempo mantengan el equilibrio ecológico, considerando la vulnerabilidad ante eventos hidrometeorológicos y el cambio climático a través del establecimiento de bases que contrarresten el proceso de deterioro ambiental, mitiguen los efectos del cambio climático y procuren un manejo responsable de recursos naturales (Secretaría de Bienestar, Sustentabilidad y Cambio Climático, 2019). Sin embargo, parece que los ordenamientos han sido poco usados o tal vez, se deba buscar algunas otras estrategias a niveles más locales, como los atlas de riesgos municipales o porque no, una planeación comunitaria, donde se vea reflejada el sentir de la comunidad; podría ser un uso donde la naturaleza y el humano se vean beneficiados, como el aprovechamiento turístico.

Se reconoce la importancia del uso de los modelos geomáticos del cambio de uso del suelo como auxiliares en el estudio de la dinámica espacio temporal en el territorio de Latinoamérica para auxiliar a los futuros programas de Ordenamiento Ecológico de Tabasco. Land Change Modeler (LCM), Cadenas de Markov (Markov), y Autómatas Celulares (CA-Markov) (Reynoso-Santos et al., 2016; Jiménez et al., 2019; Ramos-Reyes et al., 2021), han demostrado eficacia para la proyección de la dinámica interna del territorio que sirven de escenarios para generar alternativas de manejo ambiental, para la comprensión de los procesos clave y para determinar el uso del suelo futuro en términos cuantitativos, proporcionando oportunidades a los tomadores de decisiones, administradores y científicos planificadores del manejo territorial para hacer frente a futuros problemas ambientales regionales y globales (Eastman, 2012; Yang et al., 2016; Subedi et al., 2013; Clarke & Gaydos, 1998).

4. Conclusiones

En México, los procesos de cambio de uso del suelo influyen en la deforestación de los ecosistemas acuáticos y terrestres, estos afectan diversas escalas del paisaje. En el estado de Tabasco, la biodiversidad en flora y fauna es un reflejo de su clima y suelo, también de la influencia de las actividades humana; a pesar de ello, la vegetación original que persiste es exuberante y proveedor de recursos. Sin embargo, se desconoce aquellas modificaciones espacio temporal de las últimas dos décadas que

están condicionando los actuales escenarios ambientales, económicas y sociales al territorio.

Se hizo un análisis de la dinámica espacio temporal mediante Land Change Modeler donde se determinó que durante quince años (2001-2016) se perdieron 76,522 ha de humedales, 18,333 ha de selvas, y 73,591 ha de vegetación secundaria, debido al crecimiento descomunal de 148,129 ha de uso agropecuario, y la expansión de 13,375 ha de zonas urbanas. Además, mediante Cadenas de Markov y Autómatas Celulares (2016-2030), se proyectaron pérdidas de 19,152 ha de humedales, 8,324 ha de selvas, y 10,592 ha de vegetación secundaria.

La proyección espacial señala que es probable que la tendencia adversa de cambio de uso del suelo se mantenga por las incesantes transiciones donde domina el pastizal para aprovechamiento pecuario y agrícola, quienes han sido las actividades económicas y de subsistencias más importantes y que han influido en la expansión de las zonas urbanas.

Los resultados reafirman que el modelo de económico de las actividades agropecuarias, industrial, de extracción de petróleo y de crecimiento urbano han dejado a un lado la conservación y restauración de los espacios naturales. Si continúa el proceso de cambio de uso del suelo insostenible por el establecimiento del uso agropecuario y urbano, pueden perderse las últimas superficies selváticas, y humedades conservadas en las próximas décadas.

Este estudio provee información actualizada del cambio de uso del suelo sobre los ecosistemas del estado de Tabasco, se muestra la desaparición de la vegetación selvática y humedales, que son indicadores fuertes para el diseño de un nuevo Modelo de Ordenamiento Ecológico Territorial, que resalte la necesidad de crear nuevas reservas territoriales, debido a que es urgente conservar y restaurar los últimos ecosistemas en la región del Sureste de México, sin dejar de un lado el aprovechamiento del humano de los recursos naturales de una manera sustentable.

5. Referencias bibliográficas

- Agardy, T.J. y Alder, J. (2005): Coastal systems. En: Hassan, R.M., Scholes, R., Ash, N. (Eds.), *Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends*. Island Press, Washington, D.C, 515-554 <http://hdl.handle.net/102.100.100/179272?index=1>
- Alejandro-Montiel, C., Galmiche-Tejeda, Á., Domínguez-Domínguez, M. y Rincón-Ramírez, A. (2010): Cambios en la cubierta forestal del área ecoturística de la Reserva Ecológica de Agua Selva, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 12(3), 605-617. <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/611/402>
- Allub, L., y Michel, M. A. (1979): La formación socioeconómica de Tabasco y el petróleo. *Investigación Económica*, 38 (148/149), 327-355. <https://www.jstor.org/stable/42777039>
- Arriaga-Cabrera, L., Espinoza-Rodríguez, J.M., Aguilar-Zúñiga, C., Martínez-Romero, E., Gómez-Mendoza, L. y Loa-Loza, E. (2000): *Regiones terrestres prioritarias de México*. Ciudad de México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

- Barba-Macías, E., Rangel-Mendoza, J. y Ramos-Reyes, R. (2006): Clasificación de los humedales de Tabasco mediante sistemas de información geográfica. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 22(2). <https://doi.org/10.19136/era.a22n2.313>
- Camacho-Olmedo, M. T., Paegelow, M. y Mas, J. F. (2013): Interest in intermediate soft-classified maps in land change model validation: suitability versus transition potential. *International Journal of Geographical Information Science*, 27(12), 2343-2361. <https://doi.org/10.1080/13658816.2013.831867>
- Capdepon-Ballina, J. L. y Marín-Olán, P. (2014): La economía de Tabasco y su impacto en el crecimiento urbano de la ciudad de Villahermosa (1960-2010). *LiminaR*, 12(1), 144-160. <https://doi.org/10.29043/liminar.v12i1.330>
- Castillo, A. O. y Zavala, C. J. (1996): Fisiografía, recursos vegetales y alternativas de manejo en el Parque Estatal Agua Blanca, Tabasco. *Universidad y ciencia*, 12(23), 63-70. <https://doi.org/10.19136/era.a12n23.587>
- Carrera, G.E., y de la Fuente L.G. (2003) Inventario y clasificación de los humedales en México. Parte I. Ciudad de México: Ducks Unlimited de México, AC.
- Cerna, G. S. G, de la Peña, M. R., Antonio, G. G. y Reyna y Díaz, C. A. J. (2011): Tabasco y sus Asentamientos Humanos, Dos Siglos Después. Villahermosa: Secretaría de Asentamientos y Obras Públicas
- Clarke, K. C. y Gaydos, L. J. (1998): Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. *International journal of geographical information science*, 12(7), 699-714. <https://doi.org/10.1080/136588198241617>
- Comisión Económica para América Latina (2008): Tabasco. Características e Impacto Socioeconómico de las Inundaciones Provocadas a Finales de Octubre y a Comienzos de noviembre de 2007 por el Frente Frio Número 4. Ciudad de México: Naciones Unidas, CEPAL
- Comisión Nacional Forestal (2013). Línea Base Nacional de degradación de tierras y desertificación. Informe final. Zapopan, México: Comisión Nacional Forestal, Universidad Autónoma Chapingo.
- Couturier, S., Lunaa, R. H., Covarrubiasa, J. O., Rangeld, J. A. F., Kufferb, M., Sliuzasb, R. y Martíneza, R. L. (2020): Monitoreo del consumo de tierras para la expansión urbana a partir de la Huella Urbana de México, una plataforma cartográfica nacional en línea. *Terra Digitalis*, 4(1), 24-41.
- Damián, D. A., Márquez, C. O., García, V. J., Rodríguez, M. V. y Recalde, C. G. (2018): Transiciones sistemáticas en el uso y la cobertura del suelo en una microcuenca alto andina, Ecuador 1991-2011. *Revista Espacios*, 39(32). <http://www.revistaespacios.com/a18v39n32/18393208.html>
- De la Rosa-Velázquez, M. I., Espinoza-Tenorio, A., Díaz-Perera, M. Á., Ortega-Argueta, A., Ramos-Reyes, R. y Espejel, I. (2017): Development stressors are stronger than protected area management: A case of the Pantanos de Centla Biosphere Reserve, Mexico. *Land Use Policy*, 67, 340-351. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20173345424>
- Diario Oficial de la Federación. (2008): Decreto por el que se declara área natural protegida con la categoría de área de protección de flora y fauna, la región conocida como

- Cañón del Usumacinta, localizada en el Municipio de Tenosique, en el Estado de Tabasco. Ciudad de México: Congreso de la Unión
- Díaz-Perera, M. Á. (2014): La construcción histórica de las condiciones de posibilidad de un desastre: el caso de dos colonias de Villahermosa, Tabasco. En: González-Espinosa, M., y Brunel-Manse M.C. (Eds.), *Montañas, pueblos y agua: dimensiones y realidades de la cuenca Grijalva*. Ciudad de México: Editorial Juan Pablos, Ciudad de México, 1-25
- Domínguez-Domínguez, M., Zavala-Cruz, J. y Martínez-Zurimendi, P. (2011): Manejo forestal sustentable de los manglares de Tabasco. Villahermosa, México: Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental. Colegio de Postgraduados.
- Eastman, J. R. (2012): IDRISI Selva GIS and image processing software version 17.0. Massachusetts, USA: Clark Labs
- Eastman, J. R. y Toledano, J. (2018): A short presentation of the Land Change Modeler (LCM). In *Geomatic approaches for modeling land change scenarios*. Switzerland: Springer, Cham, 499-505
- Estrada-Loreto, F., Barba-Macías, E. y Ramos-Reyes, R. (2013): Cobertura temporal de los humedales en la cuenca del Usumacinta, Balancán, Tabasco, México. *Universidad y ciencia*, 29(2), 141-151. <https://doi.org/10.19136/era.a29n2.49>
- Galindo-Alcántara, A., Gama-Campillo, L. M., Ruiz-Acosta, S. y Morales-Hernández, A. (2006a): Programa de conservación y manejo del Parque Estatal Cañón del Usumacinta. Villahermosa, México: Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente.
- Galindo, A. A., Gama, L. M., Salcedo, M. A., Ruiz, A. S. D., Morales, A. y Rullán, C. (2006b). Programa de ordenamiento ecológico del estado de Tabasco. Villahermosa, México: Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente.
- Gallardo-Cruz, A., de Oca, A. F. M. 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. <http://ri.iberomx.handle/ibero/2642>
- Gama-Campillo, L. M., Díaz López, H. M., Collado Torres, R. A., Salazar Conde, E. del C. y Moguel Ordoñez, E. J. (2018): Políticas del ordenamiento ecológico de Tabasco. *Kuxulkab'*, 24(48), 37-42. <https://doi.org/10.19136/kuxulkab.a24n48.2764>
- Gracia, J. y Fuentes, O. (2004): La problemática del agua en Tabasco: Inundaciones y su control. En B. Jiménez y L. Marín (Eds.), *El agua en México vista desde la academia*. Ciudad de México: Academia Mexicana de Ciencias, 177-185
- Guerra-Martínez, V. y Ochoa-Gaona, S. (2006); Evaluación espacio-temporal de la vegetación y uso del suelo en la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, Tabasco (1990-2000). *Investigaciones geográficas*, (59), 7-25. <https://doi.org/10.14350/rig.30018>
- Gutiérrez-San Pallo, M., Ramos-Muñoz, D. E., Mesa-Jurado, M. y Díaz-Perera, M. Á. (2019): Informes de gobierno y paisaje forestal en Tabasco y Chiapas de 1947 a 1982. Entre Diversidades. *Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, (13), 233-262. <https://doi.org/10.31644/ED.V6.N2.2019.A08>
- Hernández, H. M. M. (2011): Inundación, reubicación y cotidianidad. El caso de Villahermosa, Tabasco, 2007. Tesis de Maestría. Xalapa, México: Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, Unidad Golfo

- Hernández-Melchor, G. I., Ruíz-Rosado, O., Sol-Sánchez, Á. y Valdez-Hernández, J. I. (2016): Cambios de uso del suelo en manglares de la costa de Tabasco. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(SPE14), 2757-2767.
- Hettiarachchi, M., Morrison, T. H., Wickramasinghe, D., Mapa, R., De Alwis, A. y McAlpine, C. A. (2014): La transformación ecosocial de los humedales urbanos: un estudio de caso de Colombo, Sri Lanka. *Paisaje y Urbanismo*, 132, 55-68. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.02.009>
- Henny, C. y Meutia, A. A. (2014): Urban Lakes in Megacity Jakarta: Risk and Management Plan for Future Sustainability. *Procedia Environmental Sciences*, 20, 737-746. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2014.03.088>
- Ibarra-Montoya, J. L., Román, R., Gutiérrez, K., Gaxiola, J., Arias, V. y Bautista, M. (2011): Cambio en la cobertura y uso de suelo en el norte de Jalisco, México: Un análisis del futuro, en un contexto de cambio climático. *Ambiente & Agua- An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 6(2), 111-128. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.189>
- Instituto Metropolitano de Planeación [POTMET] (2016): Plan de Ordenamiento Territorial Metropolitano del AMG. Guadalajara, Jalisco: IMEPLAN
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2015): Anuario estadístico y geográfico de Tabasco 2015. Aguascalientes, México: INEGI
- INEGI. (2022): Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250,000. Serie VI (Capa Unión), escala: 1:250 000. 1 edición. Aguascalientes, México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía
- INEGI (2015). Anuario estadístico y geográfico de Tabasco. Aguascalientes, México: INEGI
- Jiménez, A. A., Delgado, M. G., Benavente, F. A. y Vilchez, F. F. (2019): Simulación del crecimiento urbano de la zona metropolitana Tepic-Xalisco, México. *Estudios Geográficos*, 80(287), e021-e021. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201938.01>
- Kamusoko, C., Aniya, M., Adi, B. y Manjoro, M. (2009): Rural sustainability under threat in Zimbabwe—simulation of future land use/cover changes in the Bindura district based on the Markov-cellular automata model. *Applied Geography*, 29(3), 435-447. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.10.002>
- Kolb, M., Mas, J. F. y Galicia, L. (2013): Evaluating drivers of land-use change and transition potential models in a complex landscape in Southern Mexico. *International Journal of Geographical Information Science*, 27(9), 1804-1827. <https://doi.org/10.1080/13658816.2013.770517>
- Lambin, E. F., Turner, B. L., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W. y Xu, J. (2001): The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global environmental change*, 11(4), 261-269. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(01\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(01)00007-3)
- Lara Pulido, J. A., Estrada Díaz, G., Zentella Gómez, J. C. y Guevara Sanginés, A. (2017): Los costos de la expansión urbana: aproximación a partir de un modelo de precios hedónicos en la Zona Metropolitana del Valle de México. *Estudios demográficos y urbanos*, 32(1), 37-63. <https://doi.org/10.24201/edu.v32i1.1615>
- Landgrave, R., y Moreno-Casasola, P. (2012): Cuantificación de la pérdida de humedales en México. *Investigación Ambiental*, 4(1), 35-51.

- Leh, M., Bajwa, S. y Chaubey, I. (2013): Impact of land use change on erosion risk: an integrated remote sensing, geographic information system and modeling methodology. *Land Degradation & Development*, 24(5), 409-421. <https://doi.org/10.1002/ldr.1137>
- Liping, C., Yujun, S. y Saeed, S. (2018): Monitoring and predicting land use and land cover changes using remote sensing and GIS techniques-A case study of a hilly area, Jiangle, China. *PloS one*, 13(7), e0200493. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200493>
- López-Jiménez, L. N., Durán-García, R. y Dupuy-Rada, J. M. (2019): Recuperación de la estructura, diversidad y composición de una selva mediana subperennifolia en Yucatán, México. *Madera y bosques*, 25(1).
- Maldonado-Sánchez, E. A. y Maldonado-Mares, F. (2010): Estructura y diversidad arbórea de una selva alta perennifolia en Tacotalpa, Tabasco, México. *Universidad y ciencia*, 26(3), 235-245. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511587>
- Manjarrez-Muñoz, B., Hernández-Daumás, S., De Jong, B., Nahed-Toral, J., Dios-Vallejo, O. O. D. 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*, (64), 90-115. <https://doi.org/10.14350/rig.17968>
- Mifsut, I. M., & Castro, M. (2010). La Cuenca del Río Usumacinta: Perfil y perspectivas para su conservación y desarrollo sustentable. *Las Cuencas Hidrográficas de México, Diagnóstico y Priorización*; Cotler-Ávalos, H., Ed, 193-197.
- Moreno-Cáliz, E., del Carmen Gutiérrez-Castorena, M., Guerrero-Peña, A., Ortiz-Solorio, C. A. y Palma-López, D. J. (2004): Micromorfología en la clasificación de Histosoles en humedales de Tabasco, México. *Terra Latinoamericana*, 22(2), 153-160.
- Murillo, L. D. y Martínez, R. J. (2010): Comunicación para el desarrollo en México: reflexiones sobre una experiencia en el trópico húmedo. *Estudios sobre las culturas contemporáneas*, (31), 201-225.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2015): *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015*. Roma, Italia: FAO
- Paegelow, M., Camacho, M. T. y Menor, J. (2003): Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (3), 22-44. <https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/21>
- Palacio-Prieto, J. L., M. T. Sánchez-Salazar, J. M. Casado, E. Propín, J. Delgado, A. Velázquez, L. Chías, M. I. Ortiz, J. González, G. Negrete, J. Gabriel. y R. Márquez (2004): *Indicadores para la Caracterización y el Ordenamiento Territorial*, Ciudad de México: UNAM
- Palma-López, D. J., Cisneros, D. J., Moreno, C. E., y Rincón-Ramírez, J. A. (2007). *Suelos de Tabasco: su uso y manejo sustentable*. Villahermosa, México: Colegio de Postgraduados-ISPOTAB-FUPROTAB
- Palma-López, D. J., Vázquez, N. C. J., Mata, Z. E. E., López, C. A., Morales, G. M. A., Chable, P. R. y Palma-Cancino, D. Y. (2011). *Zonificación de ecosistemas y agroecosistemas susceptibles de recibir pagos por servicios ambientales en la Chontalpa, Tabasco*. Villahermosa, México: Colegio de Postgraduados Campus Tabasco, Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental

- Palomeque-De la Cruz, M. A., Galindo-Alcántara, A., Sánchez-Sánchez, A. J., Ruiz-Acosta, S. C., & Escalona-Maurice, M. J. (2017): Diagnóstico del crecimiento urbano para la planificación ambiental de Villahermosa, Tabasco, México. *Agro Productividad*, 10(10), 121-129.
- Paz-Pellat, F., Romero-Benítez, V. M., Argumedo-Espinoza, J. A., Bolaños-González, M., de Jong, B., de la Cruz-Cabrera, J. C. y Velázquez-Rodríguez, A. (2019): Dinámica del uso del suelo y vegetación. Estado del Ciclo del Carbono en México: Agenda Azul y Verde. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, 529-572.
- Perevochtchikova, M. y de la Torre, J. L. L. (2010): Causas de un desastre: Inundaciones del 2007 en Tabasco, México. *Journal of Latin American Geography*, 73-98.
- Pérez-Bustamante, L. y Salinas-Varela, E. (2007): Crecimiento urbano y globalización: transformaciones del Área Metropolitana de Concepción, Chile, 1992-2002. *Scripta Nova. Revista electrónica de Geografía y ciencias Sociales*, Barcelona-Espanha, 11(251). <http://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-251.htm>
- Pérez, L. A., Sousa, M. A. R. I. O., Hanan, A. M., Chiang, F. y Tenorio, P. (2005). Vegetación terrestre. *Biodiversidad del estado de Tabasco*, 65-110.
- Pineda-Jaimes, N. B., Bosque -Sendra, J., Gómez-Delgado, M., y 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.
- Pinkus-Rendón, M. J. y Contreras-Sánchez, A. (2012): Impacto socioambiental de la industria petrolera en Tabasco: el caso de la Chontalpa. *LiminaR*, 10(2), 122-144. <https://doi.org/10.29043/liminar.v10i2.99>
- Pontius Jr, R. G., Huffaker, D. y Denman, K. (2004): Useful techniques of validation for spatially explicit land-change models. *Ecological modelling*, 179(4), 445-461. doi:10.1016/j.ecolmodel.2004.05.010
- Secretaría de Bienestar, Sustentabilidad y Cambio Climático (2019): Programa de ordenamiento ecológico regional del estado de Tabasco (POERET). Villahermosa, México: BIENESTAR-CCGS
- Ramos-Reyes, R., Palomeque-de la Cruz, M. A., Megía-Vera, H. J., y Landeros-Pascual, D. (2021): Modelo del cambio de uso de suelo en el sistema lagunar Carmen-Pajonal-Machona, México. *Terra Latinoamericana*, 39. <https://revistaurbanismo.uchile.cl/index.php/RU/article/view/47986>
- Ramírez, M. L. y Pértile, V. C. (2017): Crecimiento poblacional, expansión urbana y cambio de usos de suelo en ciudades intermedias de la provincia del Chaco, Argentina: El caso de Juan José Castelli. *Estudios socioterritoriales*, 21, 0-0.
- Reynoso-Santos, R., Valdez-Lazalde, J. R., Escalona-Maurice, M. J., de los Santos-Posadas, H. M. y 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. <https://ojs2.fch.unicen.edu.ar/ojs-3.1.0/index.php/estudios-socioterritoriales/article/view/289>
- Rzedowski, J. y Huerta, L. (1994). *La vegetación de México*. Ciudad de México: Limusa, Noriega Editores.

- Salas-González, J. M., Leos-Rodríguez, J. A., Sagarnaga-Villegas, L. M. y Zavala-Pineda, M. J. (2013): Adopción de tecnologías por productores beneficiarios del programa de estímulos a la productividad ganadera (PROGAN) en México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 4(2), 243-254. <https://doaj.org/article/7b32db8afa784c01bd6236a40e09e0cd>
- Sánchez-Pérez, B. R., Castillo-Acosta, O. y Cámara-Cabrales, L. D. C. (2011): Regeneración natural de la selva alta perennifolia en el parque estatal Agua Blanca, Macuspana, Tabasco, México. *Polibotánica*, (32), 63-88.
- Sánchez-Munguía, A. (2005). *Uso del suelo agropecuario y deforestación en Tabasco 1950-2000*. Villahermosa: Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
- Subedi, P., Subedi, K. y Thapa, B. (2013): Application of a hybrid cellular automaton–Markov (CA-Markov) model in land-use change prediction: a case study of Saddle Creek Drainage Basin, Florida. *Applied Ecology and Environmental Sciences*, 1(6), 126-132. DOI:10.12691/aees-1-6-5
- Velasco-Tapia. (2010). Identificación de cambios en el uso del suelo y vegetación, y cálculo de la tasa de transformación del hábitat en el periodo 2000-2010, Área de Protección de Flora y Fauna Cañón del Usumacinta. Ciudad de México: CONANP
- Velázquez, A., Mas, J. F., Gallegos, J. D., Saucedo, R. M., Alcántara, P. C., Castro, R. y Palacio, J. L. (2002): Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta ecológica*, (62), 21-37. <https://www.redalyc.org/pdf/539/53906202.pdf>
- Vázquez-Negrín, I., Castillo-Acosta, O., Valdez-Hernández, J. I., Zavala-Cruz, J. y Martínez-Sánchez, J. L. (2011): Estructura y composición florística de la selva alta perennifolia en el ejido Niños Héroes Tenosique, Tabasco, México. *Polibotánica*, (32), 41-61. <https://www.polibotanica.mx/ojs/index.php/polibotanica/article/view/832/1052>
- Wang, J., Chen, Y., Shao, X., Zhang, Y. y Cao, Y. (2012): Land-use changes and policy dimension driving forces in China: Present, trend and future. *Land use policy*, 29(4), 737-749. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.11.010>
- Yang, J., Su, J., Chen, F., Xie, P. y Ge, Q. (2016): A local land use competition cellular automata model and its application. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(7), 106. <https://doi.org/10.3390/ijgi5070106>
- Zavala, J. y Castillo, A. O. (2007): Cambio de uso de la tierra en el estado de Tabasco. En: Palma, D. J., y Triano, A. (Eds.), *Plan de uso sustentable de los suelos del estado de Tabasco* (vol, II, pp. 38–56). Villahermosa, México: Colegio de Posgraduados, 38-56
- Zavala, J., Castillo, A. O., Ortiz, I. C., Palma, D. J., Salgado, G. S., Rincón, R. J. A. y Ramos, R. R. (2009): Capacidad de uso del suelo urbano en Tabasco: Con base en suelo, uso actual y vegetación. *Cárdenas, México: Colegio de Posgraduados*
- Zedler, J. B. y Kercher, S. (2005): Wetland resources: status, trends, ecosystem services, and restorability. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 30, 39-74. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.30.050504.144248>
- Zepeda-Ortega, I. E., Ángeles-Castro, G. y Carrillo-Murillo, D. G. (2019): Infraestructura carretera y crecimiento económico en México. *Problemas del desarrollo*, 50(198), 145-168.