

Modelo del cambio de uso de suelo en el sistema lagunar Carmen-Pajonal-Machona, México

Land use change model in Carmen-Pajonal-Machona lagoon system, Mexico

Rodimiro Ramos-Reyes¹ , Miguel Ángel Palomeque-De la Cruz^{2*} ,
Héctor Javier Megía-Vera³  y Daniel Landeros-Pascual³ 

¹ El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Unidad Villahermosa. Carretera a Reforma km 15.5 s/n. Ra. Guineo 2da. Sección, Centro. 86280 Villahermosa, Tabasco, México.

² División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT). Carretera Villahermosa-Cárdenas km 0.5 s/n, entronque a Bosques de Saloya. 86150 Villahermosa, Tabasco, México.

* Autor para correspondencia (migueldacbiol@hotmail.com)

³ Instituto Tecnológico Superior Villa La Venta (ITSLV). Circuito Tecnológico no.1, El Cuatro, Villa la Venta. 86410 Huimanguillo, Tabasco, México.

RESUMEN

El cambio de uso de suelo es un proceso dominante con efectos negativos sobre la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. La zona costera de Tabasco es muy importante para el desarrollo económico, por las grandes áreas de humedales costeros que desembocan al Golfo de México. Sin embargo, los humedales costeros son fuertemente alterados por el cambio de uso de suelo, debido a su cercanía con zonas urbanas, extracción de petróleo y actividades agropecuarias. También están severamente amenazadas por el cambio climático, y el incremento del nivel del mar. En este estudio, se analizó el cambio de uso de suelo en el Sistema lagunar Carmen-Pajonal-Machona en la costa de Tabasco, mediante Land Change Modeler durante 2000-2015 y se generó un escenario probabilístico-espacial en el 2030 mediante Cadenas de Markov y Automatas Celulares. Se detectó que entre el 2000-2015, los acahuales y humedales, disminuyeron junto 14 238 hectáreas. Estos cambios afectan, la disminución de los hábitats costeros y encaminan riesgos altos de inundación para la población en esta área. También la proyección 2030 son valores alarmantes porque los ecosistemas muestran pérdida de 8090 hectáreas, si no hay un cambio a favor en el paradigma del manejo del suelo costero. Por lo tanto, las tendencias futuras de cambio de uso de suelo en la costa de Tabasco pueden ser mitigadas, mediante

la puesta en marcha de las políticas de desarrollo sostenible, que impliquen una planificación a corto y mediano plazo del establecimiento de programas de Ordenamiento Territorial y la creación de Áreas Naturales Protegidas.

Palabras clave: *actividades antropogénicas, áreas naturales protegidas, cambio climático, ordenamiento territorial, zona costera.*

SUMMARY

Change in land use is a dominant process with negative effects on the structure and functioning of ecosystems. The coastal area of Tabasco is very important for economic development because of the large coastal wetland areas that flow into the Gulf of Mexico. However, coastal wetlands are strongly altered by the change in land use due to their proximity to urban areas, oil extraction and agricultural activities. They are also severely threatened by climate change and sea level rise. This study analyzed the change in land use in Carmen-Pajonal-Machona lagoon system on Tabasco coast through Land Change Modeler during 2000-2015. A probabilistic-spatial scenario was generated in 2030 through Markov Chains and Cellular Automata, detecting that secondary vegetation, wetlands, and acahuales altogether decreased 14 238 hectares from 2000-2015. These changes have affected the reduction

Cita recomendada:

Ramos-Reyes, R., Palomeque-De la Cruz, M. Á., Megía-Vera, H. J. y Landeros-Pascual, D. (2021). Modelo del cambio de uso del suelo en el sistema lagunar Carmen-Pajonal-Machona, México. *Terra Latinoamericana* 39: 1-13. e587. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.587>

Recibido: 07 de julio de 2019. Aceptado: 23 de mayo de 2020.
Artículo. Volumen 39, enero de 2021.

of coastal habitats and lead to high flood risks for the population in this area. Additionally the 2030 projection shows alarming values because the ecosystems reflect a loss of 8090 hectares if no change in favor is performed in the paradigm of coastal soil management. Therefore, future trends in land use change on the coast of Tabasco can be mitigated through the implementation of sustainable development policies that involve short- and medium-term planning of the establishment of Territorial Planning programs and the creation of Protected Natural Areas.

Index words: *anthropogenic activities, protected natural areas, climate change, land use planning, coastal zone.*

INTRODUCCIÓN

El cambio de uso de suelo por actividades antrópicas, es un proceso dominante con efectos negativos sobre la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. Un ejemplo común es la deforestación de los bosques tropicales y humedales para el establecimiento de la frontera agropecuaria con alteración de los servicios ecosistémicos (Olagunju, 2015; De Adelhart *et al.*, 2016). Los efectos más sobresalientes del cambio de uso de suelo, son la fragmentación del hábitat al ser reducida la masa forestal, disminución de la biodiversidad, erosión, fertilidad de los suelos, modificación del ciclo del agua, alteraciones en los niveles de agua, disminución de la producción de alimentos y cambios en las dinámicas poblacionales (Olagunju, 2015; De Adelhart *et al.*, 2016; Rosa *et al.*, 2016; Gallardo-Cruz *et al.*, 2019; Patarkalashvili, 2019). El cambio de uso de suelo contribuye al cambio climático y el deterioro de los socioecosistemas (Sugden, 2018; Gallardo-Cruz *et al.*, 2019). Durante muchas décadas los investigadores han demostrado que la modificación de bosques tropicales a zonas agropecuarias contribuye a la eliminación de sumideros de carbono, alteraciones en el ciclo del carbono y del clima global (Zheng *et al.*, 2015).

En México, hay un ritmo acelerado de perturbación por cambios de uso de suelo, debido al incremento en la densidad poblacional, crecimiento urbano mal planificado, la extensión de las fronteras agrícolas y pecuarias; así como, la apertura de vías de comunicación e infraestructura hidráulica, para diversos fines (Camacho-Sanabria *et al.*, 2015; Delphin

et al., 2016; Sahagún-Sánchez y Reyes-Hernández, 2018). Por ejemplo, en la década de 1960 un programa de colonización, ordenado por el gobierno federal, provocó el mayor deterioro de la selva en la península de Yucatán (Cortina-Villar *et al.*, 1999); similar fue para Tabasco y parte de la Selva Lacandona en Chiapas, donde se taló la vegetación para abrir zonas agrícolas (López-Mendoza, 1980).

En México desde la década de 1970 existen tendencias de transformación de coberturas naturales incluyendo vegetación y humedales a usos agropecuarios, para fines de producción de alimento donde la agricultura de temporal dominó la mayor parte (Rosete-Vergés *et al.*, 2014). Para la década de 1990 ya se había desforestado más de 90% de la selva original, debido al establecimiento de programas de desarrollo económico, agropecuario como el Plan Chontalpa, como la creación de nuevos centros urbanos y carreteras, provocando una mayor tasa de deforestación por cambio de uso de suelo y la implementación de instalaciones hidráulica para el control de inundaciones en la planicie (Murillo y Martínez, 2010; Pinkus-Rendón y Contreras-Sánchez, 2012; Capdepon-Ballina y Marín-Olán, 2014). En la subregión Chontalpa, Tabasco, en los últimos años la citricultura, la ganadería y los cultivos forestales se han expandido su superficie (Palma *et al.*, 2007). La modificación de las tierras de Tabasco ha sido impulsada en mayor medida por la búsqueda del crecimiento económico, tal como históricamente se ha visto en los países en vías de desarrollo (Dewan y Yamaguchi, 2009).

La zona costera de Tabasco es muy importante para el desarrollo económico, por las grandes áreas de humedales de tipo ribereños, lacustres, palustres y costeros que desembocan al Golfo de México, siendo los dos últimos los más representativos para el territorio tabasqueño (Barba *et al.*, 2006). Son espacios para el desarrollo de ambientes altamente productivos (manglares, arrecifes coralinos, lagunas costeras, marismas, estuarios, entre otros) (Burningham y Cooper 2004; Núñez-Gómez *et al.*, 2016). Los humedales de la zona costera de Tabasco son fuertemente alterados por el cambio de uso de suelo, debido su cercanía con zonas urbanas, extracción de petróleo y actividades agropecuarias; son vulnerables por el incremento del nivel del mar y cambio climático (Núñez-Gómez *et al.*, 2016; Ramos-Reyes *et al.*, 2019). La fragmentación de los humedales costeros, está frecuentemente relacionados a la perturbación

y pérdida de biodiversidad (Sánchez *et al.*, 2012; Hettiarachchi *et al.*, 2014). A nivel nacional, diversos estudios científicos demuestran la vulnerabilidad de Tabasco ante los efectos actuales del cambio climático, y la presión sobre los ecosistemas por el crecimiento acelerado de actividades productivas primarias e industriales. Esto está dado principalmente, por sus características fisiográficas y climáticas, pero también por la planificación inadecuada del desarrollo urbano, costero y de las actividades productivas en el territorio (SERNAPAM, 2015).

El estudio del cambio de uso del suelo en las zonas costeras constituye a uno de los mayores problemas de importancia científica mundial, principalmente por los ecosistemas dinámicos que proveen servicios ecológicos y económicos al ser humano, tal como lo representa el sistema costero tabasqueño (Hernández-Santana *et al.*, 2008; Hernández-Melchor *et al.*, 2016). Ante esto, es primordial conocer la distribución del cambio espacio temporal de los ecosistemas de humedales costeros y vegetación con la finalidad de evaluar las condiciones ambientales e identificar las coberturas en la que se da la mayor presión (Stefanov *et al.*, 2001; Ramos-Reyes *et al.*, 2019).

El estudio del cambio de uso de suelo, para la evaluación de la degradación de los ecosistemas se encuentra en el centro de atención de la investigación ambiental, ya que estima la distribución del cambio de coberturas naturales y usos artificiales, e identifica las coberturas que presentan los mayores impactos ambientales (Velázquez *et al.*, 2002). Por lo mismo, la modelación del cambio de uso de suelo en territorios urbanizados, rurales o naturales, es importante para predecir escenarios ambientales y socioeconómicos, con la finalidad de establecer políticas de planificación territorial (Paegelow *et al.*, 2003; Benítez *et al.*, 2012). La combinación de modelos de análisis espacial con base en transiciones como Land Change Modeler, Cadenas de Markov y los Autómatas Celulares, son muy útiles para proyectar impactos ambientales y socioeconómicos potenciales; además para la evaluación de la influencia y políticas de manejo sobre el uso de suelo (De Koning *et al.*, 1999; Veldkamp y Lambin, 2001).

El objetivo de este estudio fue analizar el cambio de uso de suelo en el Sistema lagunar Carmen-Pajonal-Machona de la zona costera de Tabasco, México (2000-2015) mediante la integración del modelador de cambio de uso de suelo (Land Change Modeler

for Ecological Sustainability), la generación de un escenario probabilístico y espacial en el 2030 mediante Cadenas de Markov y Autómatas Celulares.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio fue realizado entre los 18° 20" y los 18° 24' N; y 93° 24' y los 93° 52' O, con un área de 76 km², principalmente en H. Cárdenas, Tabasco y pequeñas áreas de los municipios de Huimanguillo y Comalcalco (Figura 1). La temperatura varía entre 27 y 3 °C. La precipitación media es de 2550 mm anuales, las lluvias se presentan todo el año, siendo más abundantes en los meses de junio a octubre. Se encuentran en su territorio dos albuferas: La Machona y la Del Carmen, las cuales se unen a la laguna El Pajonal y al Golfo de México por la barra de Santa Ana (INEGI, 2005).

Construcción de la Base de Datos Geográfica

Se adquirió una ortofoto del año 2000 y una imagen satelital SPOT del año 2015. Para identificar

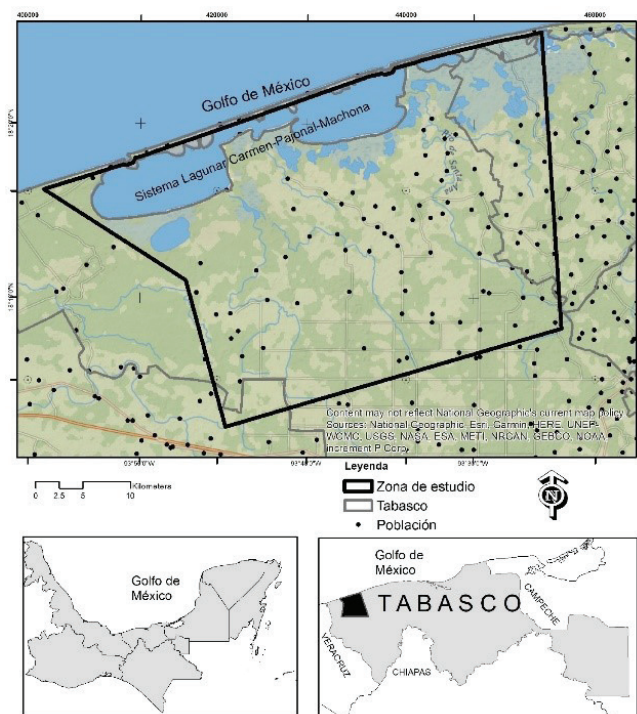


Figura 1. Sistema lagunar Carmen-Pajonal-Machona, Tabasco, México.

Figure 1. Carmen-Pajonal-Machona Lagoon System, Tabasco, Mexico.

las coberturas naturales y los principales usos de suelo, se llevó a cabo una fotointerpretación a escala de 1:15.000, aplicando los criterios de tono, forma, tamaño y textura propuestas por Ramos-Reyes *et al.* (2016a). A partir de esto, se crearon dos shapefiles correspondientes al 2000 y 2015, con Datum WGS84, Proyección UTM zona 15N, elaborados mediante digitalización en pantalla, con los programas QGIS® 2.1 y ArcGIS 10.2®. Las categorías digitalizadas fueron: acahual, humedales, agrícola, pastizal, pozos petroleros y urbano. Posteriormente, los shapefiles del 2000 y 2015 fueron transformados a formato raster con el comando RasterVector del software IDRISI TERRSET®.

Modelación del Cambio de Uso de Suelo (2000-2015)

Land Change Modeler for Ecological Sustainability (LCM) del software IDRISI TERRSET®, genera un análisis cuantitativo de imágenes en dos fechas mediante una matriz de tabulación cruzada (Pontius *et al.*, 2004), la cual consiste en una tabla con arreglos simétricos que permite ubicar con gran precisión la cantidad de cambios, las permanencias y transformaciones (ganancias, pérdidas, cambio neto y transiciones) de las coberturas entre dos fechas (Velázquez *et al.*, 2002; Pontius *et al.*, 2004). También muestra las frecuencias con las cuales las clases han permanecido iguales (a lo largo de la diagonal) o han cambiado (fuera de la diagonal) (Reynoso-Santos *et al.*, 2016).

Una vez obtenida la matriz de tabulación cruzada, se calcularon los siguientes parámetros para el análisis del cambio de uso de suelo (Pontius *et al.*, 2004; Pineda *et al.*, 2009).

Las ganancias, expresadas como la diferencia de la suma total de la fila i y los valores de la diagonal principal, es decir $G_{ij} = P_{+i} - P_{ij}$.

Las pérdidas, expresadas como la diferencia de la suma total de la columna j y los valores de la diagonal principal, es decir $L_{ij} = P_{j+} - P_{ij}$.

El cambio neto, expresado como el valor absoluto de la diferencia de las pérdidas y las ganancias de cada categoría $D_j = |L_{ij} - G_{ij}|$.

Las transiciones, expresado como el doble del valor mínimo de las ganancias o las pérdidas, es decir $S_j = 2 \times \text{MIN}(P_{+i} - P_{ij}, P_{j+} - P_{ij})$.

En este estudio, los resultados obtenidos con LCM (2000-2015) fueron las superficies de cada categoría, en la comparación con otras, en términos

de ganancias, pérdidas y cambio neto. También se obtuvieron las transiciones entre categorías. Además, el error estadístico de la matriz de tabulación cruzada fue evaluada con CROSSTAB que está integrado en el software IDRISI TERRSET®. Este módulo generó el índice promedio de Kappa = 0.7907, que indicó un grado aproximado de correlación óptima entre los dos mapas de uso de suelo 2000 y 2015, ambos en sentido general, y sobre una base por categoría como lo señalado en estudios de Reynoso-Santos *et al.* (2016).

Cálculo de las Tasas de Cambio (2000-2015)

La tasa de cambio de uso de suelo identifica el tipo y magnitud de la presión sobre los recursos naturales, e indica de manera porcentual el cambio anual de la superficie de una categoría de uso al inicio de cada año de análisis (Velázquez *et al.*, 2002; Palacio *et al.*, 2004). Para su cálculo, se utilizaron los mapas de uso de suelo y coberturas de 2000 y 2015 mediante la fórmula propuesta por Palacio *et al.* (2004):

$$Td = [(S2/s1)/n-1] \cdot 100$$

dónde: $s1$, es el área cubierta por determinado uso de suelo al inicio del periodo; $S2$, es el área cubierta por determinado uso de suelo al final del periodo, y n , es el número de años del periodo de análisis.

Cadenas de Markov (2030)

La matriz de predicción probabilística y el escenario espacial de uso de suelo (2030) se proyectaron con las técnicas combinadas de los modelos de transición: Cadenas de Markov (MARKOV) y Autómatas Celulares (CA-MARKOV) que están integrados en el software IDRISI TERRSET®. Las Cadenas de Markov se utilizaron para generar una matriz de transición que calcula la probabilidad de cambio de un pixel a otro (Eastman, 2012; Reynoso-Santos *et al.*, 2016). Simulan la predicción del estado de un sistema en un tiempo determinado a partir de dos estados precedentes (Paegelow *et al.*, 2003). Es un procedimiento en donde el valor en el tiempo ($t1$) depende de los valores en los tiempos ($t0$ y $t-1$). La predicción se materializa en una serie de mapas de categorías de usos del suelo, en donde el nivel digital de cada pixel expresa la probabilidad de pertenecer a la categoría analizada (Paegelow *et al.*, 2003; Eastman, 2012).

Con el módulo MARKOV de IDRISI TERRSET® se cruzaron los mapas de uso de suelo de 2000 y 2015, con un margen de error de 15%, para crear una matriz de probabilidad de cambio en un tercer periodo de aproximadamente 15 años (2030) (Eastman, 2012). Para la proyección del 2030, el modelo generó (1) una matriz de probabilidades de cambios, (2) una matriz de áreas de cambio, que contiene el número de píxeles que se espera cambien de una clase de uso a otro durante el periodo de tiempo asignado, y (3) una colección de seis imágenes de áreas de adecuación, o aptitud (Figura 2) (Eastman, 2012; Reynoso-Santos *et al.*, 2016).

Autómatas Celulares (2030)

Los Autómatas Celulares funcionan como un conjunto de elementos idénticos, llamado células o celdas, cada una de las cuales se encuentra en un espacio discreto (Clarke y Gaydos, 1998). Es un método de representación espacial, que se compone de reglas de transición. En este modelo se integra la matriz de probabilidad de cambios previamente elaborada (MARKOV) para crear un mapeo perfecto de la distribución espacial (Eastman, 2012). Con

el módulo de Autómatas Celulares CA-MARKOV del software IDRISI TERRSET® se construyó un escenario espacial a partir de combinación de la imagen de uso de suelo (2015), la matriz de áreas de cambio (2030) y la colección de las seis imágenes de áreas de adecuación, o aptitud (2030) construidas con MARKOV.

La proyección espacial de los Autómatas Celulares se fundamenta en un proceso interactivo de asignación de terrenos, y también por un proceso de filtrado de un promedio de 12 interacciones que disminuye la adecuación del suelo distantes a las áreas existentes (Eastman, 2012; Reynoso-Santos *et al.*, 2016). El módulo emplea un filtro de contigüidad de 5×5 píxeles para predecir cambios celulares significativos (Eastman, 2012). La idoneidad del modelo se evaluó a través de una comparación de similitud entre la imagen de uso de suelo (2015) y la proyección de uso de suelo (2030), para ello se empleó el módulo VALIDATE de IDRISI TERRSET®, donde el estadístico Kappa señaló que $K_{standard} = 0.8990$, $K_{no} = 0.9164$, $K_{localition} = 0.9469$ y $K_{locationStrata} = 0.9469$, fueron cercanas a 1.000 mostrando gran precisión para la construcción de escenarios prospectivos del uso de suelo (Figura 3).

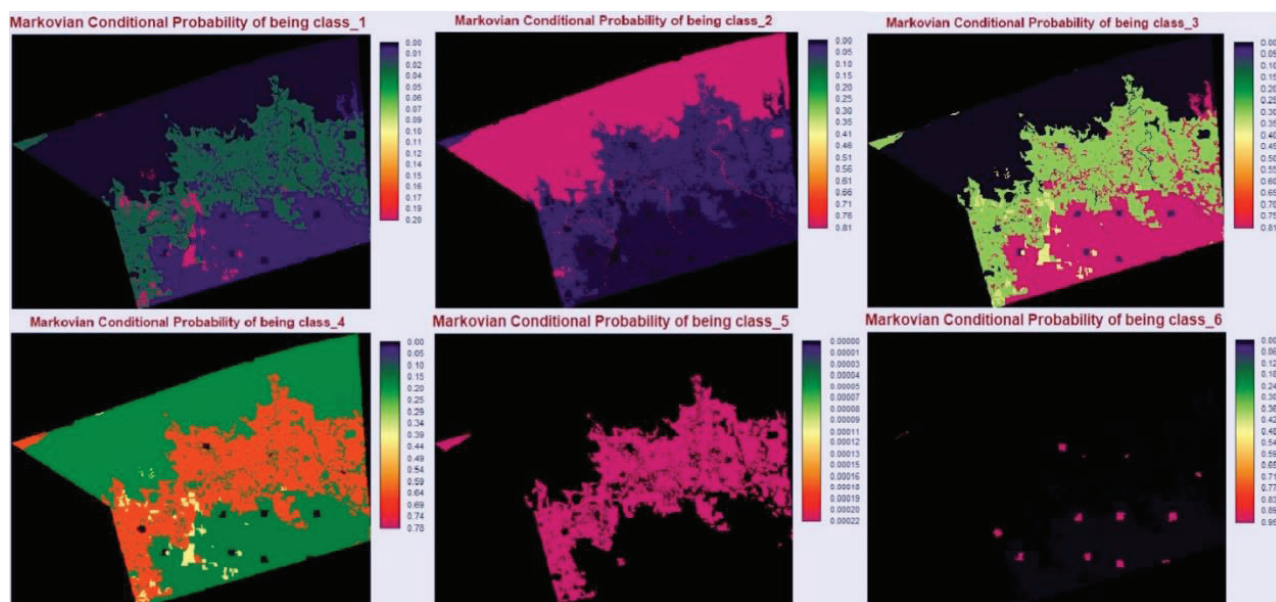


Figura 2. Colección de imágenes de áreas de adecuación, o áreas de aptitud (2030) en el Sistema Lagunar Carmen-Pajonal-Machona, Tabasco, México. class_1 = acahual; class_2 = humedales; class_3 = agrícola; class_4 = pastizal; class_5 = pozos petroleros; class_6 = urbano.

Figure 2. Collection of images of areas of adequacy, or aptitude areas (2030) in Carmen-Pajonal-Machona Lagoon System, Tabasco, Mexico. class_1 = acahual; class_2 = wetlands; class_3 = agricultural; class_4 = grassland; class_5 = oil wells; class_6 = urban.

Multiples of Base Resolution (MBR):		1x	1	Information of Quantity	
Information of Location		No[n]	Medium[m]	Perfect[p]	
Perfect[P(x)]		0.5850	0.9645	1.0000	
PerfectStratum[K(x)]		0.5850	0.9645	1.0000	
MediumGrid[M(x)]		0.5327	0.9283	0.9049	
MediumStratum[H(x)]		0.1429	0.2841	0.2863	
No[N(x)]		0.1429	0.2841	0.2863	
AgreeGridcell	= 0.6443	DisagreeQuantity	= 0.0355	Kstandard	= 0.8999
AgreeStrata	= 0.0000	DisagreeStrata	= 0.0000	Kno	= 0.9164
AgreeQuantity	= 0.1412	DisagreeGridcell	= 0.0362	Klocation	= 0.9469
AgreeChance	= 0.1429			KlocationStrata	= 0.9469

Figura 3. Resultados del módulo validate (2015 v/s 2030) en el Sistema Lagunar Carmen-Pajonal-Machona, Tabasco, México.

Figure 3. Validate module results (2015 v/s 2030) in Carmen-Pajonal-Machona Lagoon System, Tabasco, Mexico.

Modelación del Cambio de Uso de Suelo (2015-2030)

Posteriormente, la imagen de usos del suelo de 2015 y la proyección de uso de suelo del 2030, también fueron cruzadas con Land Change Modeler. En este análisis con LCM, el índice promedio de Kappa = 0.8999, indicó un grado aproximado de correlación óptima entre los dos mapas de uso de suelo 2015 y 2030. Los resultados fueron las superficies de cada categoría, en la comparación con otras, en términos de ganancias, pérdidas y cambio neto. También se obtuvieron las transiciones entre categorías y tasas de cambio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cambio de Uso de Suelo (2000-2015)

En el año 2000 45.3% de la costa de Tabasco lo ocupaban los humedales (ríos, lagunas costeras, pantanos, manglares y la vegetación hidrófila), en tanto los acahuales (vegetación secundaria derivada de deforestación y regeneración de la cobertura arbórea original) les correspondía 2.6% (Cuadro 1). Contrario a esto, la zona agrícola (cultivos de cacao, caña de azúcar y copra), ocupaba 19.9%, mientras que

Cuadro 1. Síntesis de las superficies y porcentajes del cambio de uso de suelo 2000-2015, Tabasco, México.

Table 1. Synthesis of the areas and percentages of the change in land use 2000-2015, Tabasco, Mexico.

Categorías	2000		2015		Perdidas	Ganancias	Cambio neto	Tasa de cambio
	ha	%	ha	%				
ACH	3458	2.6	2183	1.6	-2770	1496	-1275	-3.0
HUM	60 799	45.3	50 768	37.8	-11 468	1451	-10 017	-1.2
AGR	26 765	19.9	35 605	26.5	-5211	14 051	8840	1.9
PAZ	40 557	30.2	42 780	31.9	-14 551	16 774	2223	0.4
PPE	13	0	9	0	-13	9	-4	-2.4
URB	677	0.5	909	0.7	0	265	232	1.9

ACH = acahual; HUM = humedales; AGR = agrícola; PAZ = pastizal; PPE = pozos petroleros; URB = urbano.

ACH = acahual; HUM = wetlands; AGR = agricultural; PAZ = grassland; PPE = oil wells; URB = urban.

el pastizal 30.2% y la zona urbana 0.5% (Cuadro 1). Sin embargo, durante el periodo (2000-2015), el análisis espacio temporal detectó que los acahuales presentaron pérdidas elevadas, representando 1.6% del territorio con una tasa negativa de cambio de 3.0% (Cuadro 1). Otro deterioro importante ocurrió con los humedales al perder elevadas coberturas ocupando 37.8% con una tasa negativa de cambio de 1.2%. También sobresale que el área agrícola, el pastizal y el área urbana aumentaron sus superficies (26.5, 31.9 y 0.7%), con tasas de cambio de 1.9, 0.4 y 1.9% respectivamente (Cuadro 1; Figura 4).

Las transiciones más sobresalientes durante 2000-2015, fueron el cambio de 12 287 ha de pastizal a uso agrícola, y 10 831 ha de coberturas de humedales a pastizal (Figura 5). Otras transiciones importantes fueron 4486 ha de zonas agrícolas a pastizal, 1031 ha de coberturas de acahuales a zonas agrícolas y la regeneración de acahuales sobre 1138 ha de pastizal (Figura 5).

La presencia de coberturas de acahuales por producto de la perturbación de la selva en la zona costera de Tabasco, coincide con la deforestación de 9.3% de la vegetación natural en los municipios costeros de México donde 7.1% se dio en la franja de 2 km de ancho y 14% sobre dunas durante el periodo 1970-2000 (Seingier *et al.*, 2009). Particularmente en Tabasco, un marcado proceso deforestación influenciado por políticas de desarrollo económico y social provocaron que durante 1950-2000, las superficies de selvas distribuida en ejidos y propiedad privada de 538 861 ha

en 1950; 10 años después disminuyera a 453 411 ha; en 1970 el cambio de uso de suelo impactó a la selva dejándola en 146 485 ha, posteriormente se redujeron a 71 387 ha en 1980 y 41 079 en 1990, la deforestación del periodo 1950 a 1990 se relacionó principalmente con el incremento del número de cabezas de ganado que fue la actividad económica que sustituyó la exportación de plátano y otros productos agrícolas (Sánchez-Munguía, 2005).

Es relevante mencionar que la transición de acahuales sobre el pastizal, significa que existe un proceso de regeneración natural e inducido, debido a que una de las estrategias de conservación, restauración y fomento de los últimos espacios de selva adecuada en Tabasco ha sido el pago de servicios ambientales que tuvo efectos benéficos en la regeneración de la selva y en la economía de los productores, de esta forma, con PROARBOL se impulsó la conservación de los bosques del Sureste de México. En Tabasco el programa PRODEPLAN logró que durante el 2000-2006 se reforestaron 75 000 ha (Alejandro-Montiel *et al.*, 2010).

Por otra parte, los humedales lacustres y palustres de Tabasco se están deteriorando debido a la expansión de la actividad agropecuaria, el crecimiento de asentamientos urbanos de forma desordenada, la construcción de zonas industriales y carreteras principalmente para las actividades petroleras e inmobiliarias (Estrada *et al.*, 2013). Este proceso de deterioro se relaciona con las grandes transformaciones para el establecimiento de la frontera agropecuaria en

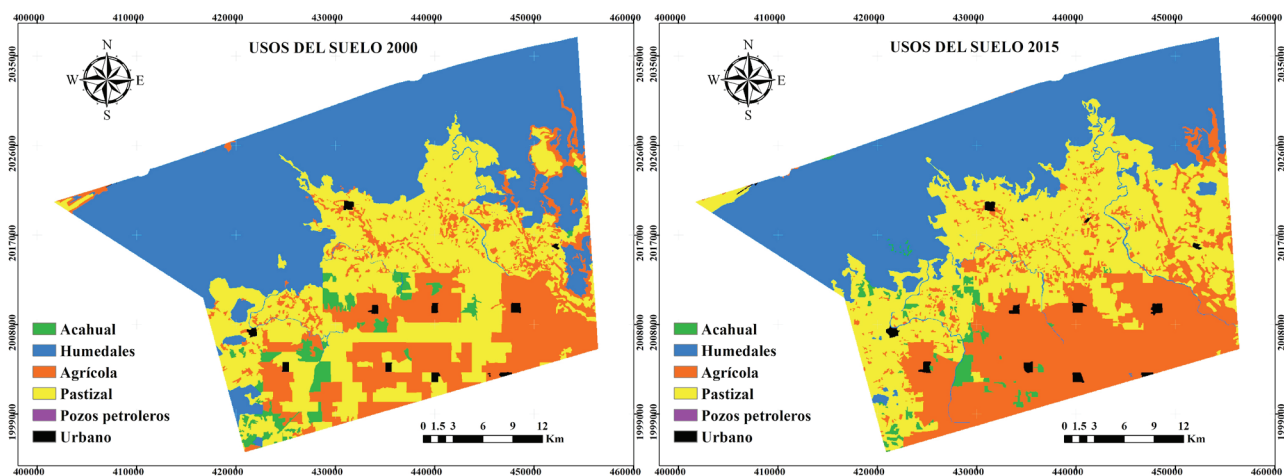


Figura 4. Mapas de los usos de suelo 2000 y 2015, Tabasco, México.
Figure 4. Maps of land uses 2000 and 2015, Tabasco, Mexico.

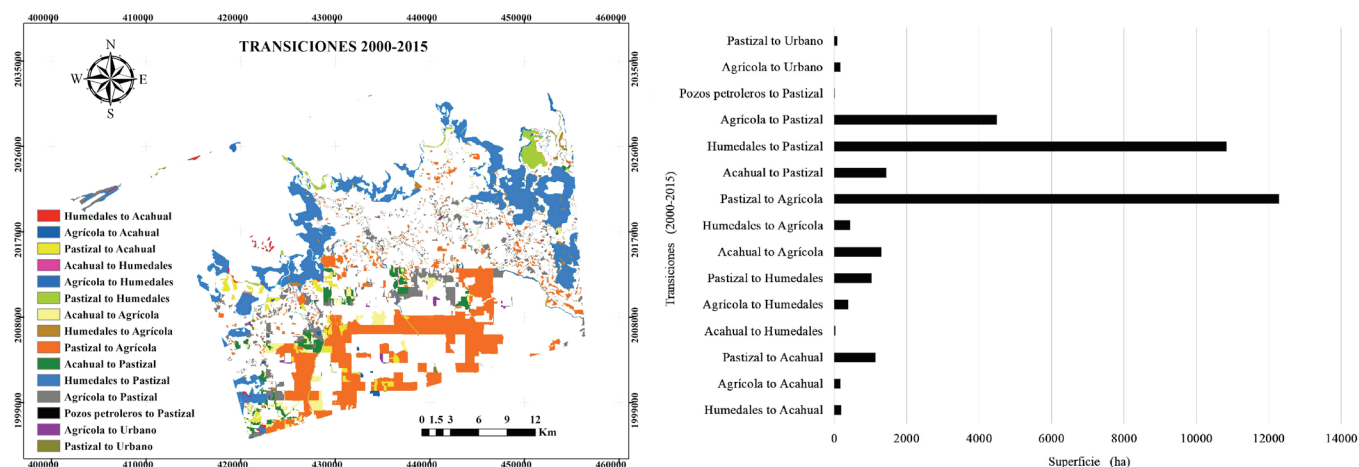


Figura 5. Mapa de las transiciones con graficas de superficies 2000-2015, Tabasco, México.
Figure 5. Map of transitions with surface graphs 2000-2015, Tabasco, Mexico.

la subregión Chontalpa, Tabasco, durante 1950 al 2000, donde se perdió alrededor de 83 518 ha de humedales, se invadieron lagunas y pantanos, se eliminaron popales y tulares que funcionaban como vasos reguladores; estas pérdidas fueron a un ritmo de 3341 ha año⁻¹ (Sánchez-Munguía, 2005).

Hay que considerar que la pérdida de humedales en la zona costera del Golfo de México se debe igual a que año con año se va reduciendo el litoral, reportando entre 5 y 7 m por año de dicha línea costera (Núñez-Gómez *et al.*, 2016); de la misma forma por los efectos de la actividad humana o por los cambios globales relacionados con el cambio climático (CEPAL, 2012; IPCC, 2012; Ramos-Reyes *et al.*, 2016b). El Golfo de México y el Pacífico, ambas perdieron más cobertura natural y también coinciden como índices más altos de marginación costera mexicana, son lecciones para no repetir este tipo de acciones negativas a los ambientes costeros (Seingier *et al.*, 2009).

Probabilidades de Cambio de Uso de Suelo (2030)

La matriz de probabilidad de cambio elaborada con Cadenas de Markov 2030 cuantificó la eliminación del acahual para el establecimiento de áreas agrícolas y superficies de pastizal registró altas probabilidades de 0.38 y 0.41% (Cuadro 2). De la misma forma los humedales presentaron importante probabilidad de 0.18%, para su conversión a pastizal. Entre otras probabilidades de transición sobresale el abandono de pozos petroleros para ser ocupado por pastizales con probabilidad de 0.78% (Cuadro 2).

Cambio de Uso de Suelo (2015-2030)

El cambio de uso de suelo entre el mapa del 2015 (Figura 2) y la proyección del 2030 elaborado con CA-MARKOV (Figura 6) detectó pérdidas elevadas de acahual al representar 1.5% del territorio con una tasa de pérdida anual de -3.2% (Cuadro 3). De la misma forma los humedales presentaron pérdidas y ocuparon 32.4% con una tasa de cambio anual de -2.1% (Cuadro 3). Las zonas de actividades primarias y asentamientos humanos continuaron aumentando en la costa; debido a esto, el área agrícola representó 32.4%, el pastizal 32.9% y el área urbana 0.8% del territorio (Cuadro 3).

Cuadro 2. Matriz de probabilidad de cambios 2030 en el Sistema Lagunar Carmen-Pajonal-Machona, Tabasco, México.
Table 2. 2030 change probability matrix in Carmen-Pajonal-Machona Lagoon System, Tabasco, Mexico.

	ACH	HUM	AGR	PAZ	PPE	URB
ACH	0.1989	0.008	0.3767	0.4164	0.0000	0.0000
HUM	0.0031	0.8113	0.0073	0.1782	0.0000	0.0001
AGR	0.0063	0.0143	0.8053	0.1676	0.0000	0.0065
PAZ	0.0281	0.0254	0.303	0.6412	0.0002	0.0021
PPE	0.0000	0.0065	0.0392	0.7843	0.0000	0.0000
URB	0.0037	0.0089	0.0251	0.0107	0.0000	0.9516

ACH = acahual; HUM = humedales; AGR = agrícola; PAZ = pastizal; PPE = pozos petroleros; URB = urbano.

ACH = acahual; HUM = wetlands; AGR = agricultural; PAZ = grassland; PPE = oil wells; URB = urban.

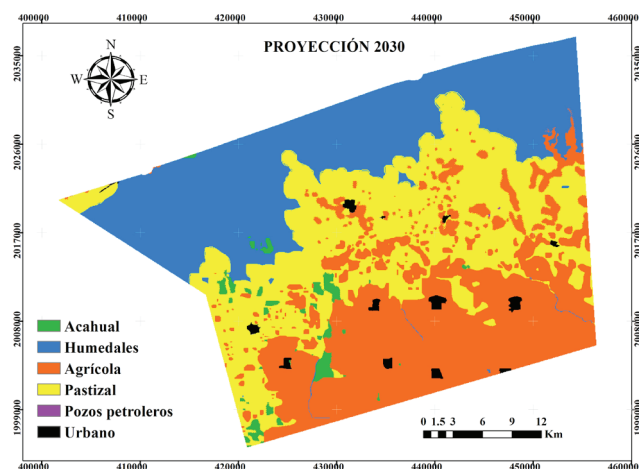


Figura 6. Mapa de la proyección 2030 (CA-MARKOV).
 Figure 6. Map of the 2030 projection (CA-MARKOV).

Las transiciones más sobresalientes durante 2015-2030 fueron el cambio de 7969 ha de humedales a pastizal (Figura 7). Otras transiciones fueron las transformaciones de 7022 ha de pastizal a uso agrícola, y los desplazamientos de 587 ha de acahuales a uso agrícola, así como remplazo de 206 ha de uso agrícola para el crecimiento urbano (Figura 7).

Land Change Modeler, Cadenas de Markov y Autómatas Celulares, son modelos geomáticos completos y de sencilla ejecución, ya que incorporan el efecto de la interacción espacial y la dinámica temporal con reglas sencillas, y sin otros requerimientos cartográficos como lo señalado en la metodología (Mitsova *et al.*, 2011). Los grupos de trabajo enfocados

en la aplicación de estos modelos cada día son más crecientes y las aplicaciones han tomado diversas disciplinas enfocadas hacia dinámicas ambientales, variadas y complejas como la deforestación y restauración ambiental en regiones tropicales, erosión del suelo y crecimiento urbano (Aguilera-Benavente, 2006; Mas *et al.*, 2009).

Sin embargo, existen variables geográficas que influyen el cambio de uso de suelo en las que destacan las de tipo físico (como pendiente, relieve, orientación), socioeconómicos (densidad de población, distancia zonas urbanas, centros de población, turísticos, comerciales e industriales) ambiental (distancia a Áreas Protegidas, cuerpos de agua, tipo de suelo) (Palomeque-de la Cruz *et al.*, 2017). Estas variables previamente recopiladas, digitalizadas, georreferenciadas, transformadas a formato raster y normalizadas mediante métodos difusos y de distancia (Velázquez *et al.*, 2002), también pueden ser integradas LCM usando el módulo de Potencial de Transición basado en redes neuronales artificiales (RNA) localizado en TERSEET que facilita el análisis espacio temporal encontrando las "reglas" que influyen en la dinámica de los cambios, las variables que las condicionan y proyecciones futuras (Díaz-Pacheco y Hewitt, 2014). Las variables geográficas también pueden ser integradas al módulo CA-MARKOV empleando la técnica de Evaluación Multicriterio (EMC) para crear mapas ponderados con métodos de lógica difusa fuzzy para la simulación de proyecciones con idoneidad de representación de la realidad espacial (Thapa y Murayama, 2011).

Cuadro 3. Síntesis de las superficies y porcentajes del cambio de uso de suelo 2015-2030 en el Sistema Lagunar Carmen-Pajonal-Machona, Tabasco, México.

Table 3. Synthesis of the surfaces and percentages of the change in land use 2015-2030 in Carmen-Pajonal-Machona Lagoon System, Tabasco, Mexico.

Categorías	2015		2030		Perdidas	Ganancias	Cambio neto	Tasa de cambio
	ha	%	ha	%				
ACH	3458	2.6	2016	1.5	-587	420	-168	-3.5
HUM	60 799	45.3	42 818	32.4	-8090	140	-7950	-2.3
AGR	26 765	19.9	42 854	32.4	-367	7609	7243	3.2
PAZ	40 557	30.2	43 453	32.9	-7326	8000	674	0.5
PPE	13	0.0	9	0.0	-7	7	0	-2.4
URB	677	0.5	1119	0.8	0	207	201	3.4

ACH = acahual; HUM = humedales; AGR = agrícola; PAZ = pastizal; PPE = pozos petroleros; URB = urbano.
 ACH = acahual; HUM = wetlands; AGR = agricultural; PAZ = grassland; PPE = oil wells; URB = urban.

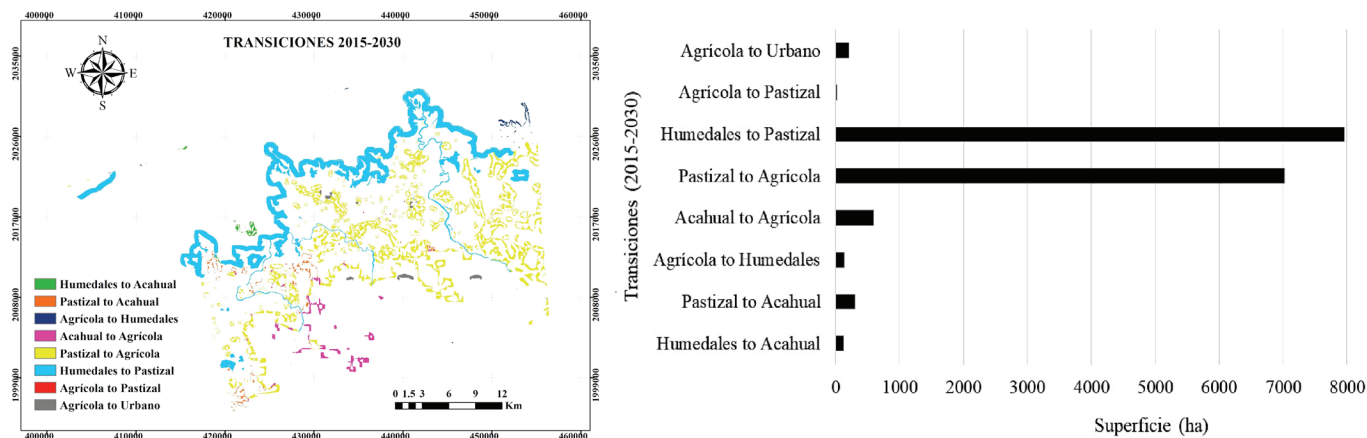


Figura 7. Mapa de las transiciones con graficas de superficies 2015-2030 en el Sistema Lagunar Carmen-Pajonal-Machona, Tabasco, México.

Figure 7. Map of transitions with surface graphs 2015-2030 in Carmen-Pajonal-Machona Lagoon System, Tabasco, Mexico.

Cabe mencionar que, debido a los objetivos del proyecto, la limitada adquisición de información cartográfica actual y, el limitado conocimiento en geomática avanzada, geoestadística, y la planificación previa en los requerimientos técnicos que los módulos de Redes Neuronales, y Evaluación Multicriterio requieren; solo se optó por emplear la serie de mapas de probabilidad condicional, o aptitud resultante del módulo MARKOV derivadas de las imagen de 2000 y 2015, al considerar que la dinámica espacial del paisaje de la zona costera, también es de tipo lineal y no considera la influencia de factores externos sobre el cambio de uso de suelo (Pontius *et al.*, 2004; Reynoso-Santos *et al.*, 2016), sino que también se basa en la dinámica interna del sistema (Paegelow *et al.*, 2003; Reynoso-Santos *et al.*, 2016).

El escenario de cambio de uso de suelo de 2015 al 2030 del presente estudio, es un ejemplo sobre los posibles impactos ambientales a los ecosistemas terrestres y acuáticos de la Costa de Tabasco, si no hay un cambio en la actual política de desarrollo económico en los estados costeros de México. Por lo tanto, uno de los instrumentos prioritarios para la restauración de estos ecosistemas es la actualización de programas de ordenamiento ecológico en la costa de Tabasco, que orienten y evalúen el establecimiento y desarrollo de las actividades productivas, los asentamientos humanos y la conservación de los recursos naturales, regulando y disminuyendo los impactos ambientales (Galindo *et al.*, 2006). También generando políticas públicas enfocadas a la conservación de los humedales costeros,

así como aquellas coberturas vegetales que sirven de barrera para mitigar la erosión y la intrusión salina en la costa tabasqueña.

La integración de los modelos geomáticos del cambio de uso de suelo, son novedosos para generar propuestas de desarrollo sostenible, que impliquen una planificación que incluya a corto y mediano plazo el establecimiento de programas de Ordenamiento Territorial, con objetivos de reducción de los efectos de los fenómenos hidrometeorológicos extremos, fortalecidos por el ascenso del nivel del mar (Hernández-Santana *et al.*, 2008), la creación de Áreas Naturales Protegidas, tierras de trabajo para los pobladores dedicados a las actividades productivas, extracción de petróleo y la disponibilidad de infraestructura urbana y vivienda construida en zonas no vulnerables, ante los estragos del cambio climático como las inundaciones, sequías y pérdida de la línea costera (Benítez *et al.*, 2012).

CONCLUSIONES

En el sistema lagunar Carmen-Pajonal-Machona se ha detectado que los ecosistemas arbóreos y humedales costeros, disminuyeron en conjunto 14 238 hectáreas. Estos cambios afectan, por un lado, la pérdida de los ecosistemas costeros y por otro, representan probabilidades altas de inundación para la población asentada en esta área. Por su parte, la prospectiva para el 2030 indica la pérdida de 8090 ha de los ecosistemas si no hay un cambio significativo en el paradigma del

manejo del suelo costero. Por lo tanto, las tendencias futuras de cambio de uso de suelo en la costa de Tabasco pueden ser mitigadas, mediante la puesta en marcha de las políticas de desarrollo sostenible, que impliquen una planificación a corto y mediano plazo del establecimiento de programas de Ordenamiento Territorial, la creación de Áreas Naturales Protegidas que no sean afectadas por las tierras de trabajo de los pobladores, la extracción de petróleo y la disponibilidad de infraestructura urbana y vivienda construida en zonas no vulnerables ante los estragos del cambio climático como las inundaciones y pérdida de la línea costera.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FONDOS

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Administración del proyecto y adquisición de fondos: R.R.R., contribuyó en la búsqueda de recursos para el trabajo de campo y adquisición de datos geográficos. Análisis formal: M.Á.P. de la C. y D.L.P., contribuyeron con el análisis espacio temporal ejecutando modelos geomáticos incluidos en Idrisi Terrset. Conceptualización: R.R.R., M.Á.P. de la C. y H.J.M.V., contribuyeron en formulación y desarrollo de ideas, objetivos de la investigación. Escritura: preparación del borrador original: R.R.R. y M.Á.P.

de la C. contribuyeron en la redacción general del manuscrito. Escritura: revisión y edición: H.J.M.V. y D.L.P. contribuyeron en corrección de estilo, normas editoriales, edición de gráficas y cuadros.

AGRADECIMIENTOS

No aplicable.

LITERATURA CITADA

- Aguilera-Benavente, F. 2006. Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares. *GeoFocus. Rev. Int. Cienc. Technol. Infor. Geogr.* 6: 81-112.
- Alejandro-Montiel, C., A. Galmiche-Tejeda, M. Domínguez-Domínguez y A. Rincón-Ramírez. 2010. Cambios en la cubierta forestal del área ecoturística de la reserva ecológica de agua selva, México. *Trop. Subtrop. Agroecosyst.* 12: 605-617.
- Barba-Macías, E., J. Rangel-Mendoza y R. Ramos-Reyes. 2006. Clasificación de los humedales de Tabasco mediante sistemas de información geográfica. *Univ. Cienc. Tróp. Húm.* 22: 101-110.
- Benítez, G., A. Pérez-Vázquez, M. Nava-Tablada, M. Equihua, and J. L. Álvarez-Palacios. 2012. Urban expansion and the environmental effects of informal settlements on the outskirts of Xalapa City, Veracruz, Mexico. *Environ. Urbanizat.* 24: 149-166. doi: <https://doi.org/10.1177/0956247812437520>.
- Burningham, H. and J. A. G. Cooper. 2004. Morphology and historical evolution of north-east Atlantic coastal deposits: The west Donegal estuaries, north-west Ireland. *J. Coastal Res.* 41: 148-159.
- Camacho-Sanabria, J. M., J. I. Juan-Pérez, and N. B. Pineda-Jaimes. 2015. Modeling of land use/cover changes: prospective scenarios in the Estado de Mexico. Case study—Amanalco de Becerra. *Rev. Chapingo Serie Cienc. For. Amb.* 21: 203-220. doi: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.10.049>.
- Capdepon-Ballina, J. L. y P. Marín-Olán. 2014. La economía de Tabasco y su impacto en el crecimiento urbano de la ciudad de Villahermosa (1960-2010). *LiminaR.* 12: 144-160.
- Clarke, K. C. and L. J. Gaydos. 1998. Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. *Int. J. Geogr. Informat. Sci.* 12: 699-714. doi: <https://doi.org/10.1080/136588198241617>.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2012. Efectos del cambio climático en las costas de América Latina y el Caribe: Vulnerabilidad y Exposición. CEPAL. Naciones Unidas. Santiago de Chile.
- Cortina-Villar, S., P. Macario-Mendoza y Y. Ogneva-Himmelberger. 1999. Cambios en el uso del suelo y deforestación en el sur de los estados de Campeche y Quintana Roo, México. *Invest. Geogr.* 38: 41-56.
- De Adelhart T., R. L., J. C. J. Groot, and L. Brussaard. 2016. Framework to assess investments in agriculture. In response to FAO-OECD Guidance for Responsible Supply Chains. Wageningen University. Wageningen UR. The Netherlands.

- De Koning, G. H. J., P. H. Verburg, A. Veldkamp, and L. O. Fresco. 1999. Multi-scale modelling of land use change dynamics in Ecuador. *Agric. Syst.* 61: 77-93. doi: [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(99\)00039-6](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(99)00039-6).
- Delphin, S., F. J. Escobedo, A. Abd-Elrahman, and W. P. Cropper. 2016. Urbanization as a land use change driver of forest ecosystem services. *Land Use Pol.* 54: 188-199. doi: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.02.006>.
- Dewan, A. M. and Y. Yamaguchi. 2009. Land use and land cover change in Greater Dhaka, Bangladesh: Using remote sensing to promote sustainable urbanization. *Appl. Geogr.* 29: 390-401. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.12.005>.
- Díaz-Pacheco, J. y R. J. Hewitt. 2014. Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software. *GeoFocus. Rev. Int. Cienc. Tecnol. Infor. Geogr.* 14: 1-22.
- Eastman, J. R. 2012. IDRISI Selva GIS and image processing software released. Version 17.0. Clark University. Worcester, MA, USA.
- Estrada L., F., E. Barba M. y R. Ramos R. 2013. Cobertura temporal de los humedales en la cuenca del Usumacinta, Balancán, Tabasco, México. *Univ. Cienc.* 29: 141-151.
- Galindo A., A., L. M. Gama C., M. A. Salcedo M., S. D. Ruiz A., A. Morales y C. Rullán. 2006. Programa de ordenamiento ecológico del estado de Tabasco. Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente. Villahermosa, Tabasco, México.
- Gallardo-Cruz, J. A., A. Fernández-Montes de Oca y C. Rives. 2019. Detección de amenazas y oportunidades para la conservación en la cuenca baja del Usumacinta a partir de técnicas de percepción remota. *Ecosistemas* 28: 82-99. doi: <https://doi.org/10.7818/ECOS.1611>.
- Hernández-Melchor, G. I., O. Ruiz Rosado, Á. Sol Sánchez y J. I. Valdez Hernández. 2016. Cambios de uso del suelo en manglares de la costa de Tabasco. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 7: 2757-2767. doi: <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i14.444>.
- Hernández-Santana, J. R., M. A. Ortiz-Pérez, A. P. Méndez-Linares y L. Gama-Campillo. 2008. Morfodinámica de la línea de costa del estado de Tabasco, México: tendencias desde la segunda mitad del siglo XX hasta el presente. *Invest. Geog.* 65: 7-21.
- Hettiarachchi, M., T. H. Morrison, D. Wickramasinghe, R. Mapa, A. De Alwis, and C. A. McAlpine. 2014. The eco-social transformation of urban wetlands: A case study of Colombo, Sri Lanka. *Landscape Urban Plann.* 132: 55-68. doi: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.08.006>.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2005. Cuéntame INEGI. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2012. Resumen para responsables de políticas en el informe especial sobre la gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático. Cambridge, UK.
- López-Mendoza, R. 1980. Tipos de vegetación y su distribución en el estado de Tabasco y norte de Chiapas. Depto. de Publicaciones de la Dirección de Difusión Cultural de la Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Edo. de México, México. ISBN: 9789688842829.
- Mas, J. F., A. Velázquez y S. Couturier. 2009. La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana. *Invest. Amb. Cienc. Polít. Públ.* 1: 23-39.
- Mitsova, D., W. Shuster, and X. Wang. 2011. A cellular automata model of land cover change to integrate urban growth with open space conservation. *Landscape Urban Plann.* 99: 141-153. doi: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.10.001>.
- Murillo L., D. y J. Martínez R. 2010. Comunicación para el desarrollo en México: reflexiones sobre una experiencia en el trópico húmedo. *Estud. Cult. Contemp.* 31: 201-225.
- Núñez-Gómez, J. C., R. Ramos-Reyes, E. Barba-Macias, A. Espinoza-Tenorio y L. M. Gama-Campillo. 2016. Índice de vulnerabilidad costera del litoral tabasqueño, México. *Invest. Geogr.* 91: 70-85. doi: <https://doi.org/10.14350/rig.50172>.
- Olagunju, T. E. 2015. Drought, desertification and the Nigerian environment: A review. *J. Ecol. Nat. Environ.* 7: 196-209. doi: <https://doi.org/10.5897/JENE2015.0523>.
- Paegelow, M., M. T. Camacho-Olmedo y J. Menor-Toribio. 2003. Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje. *GeoFocus. Rev. Int. Cienc. Tecnol. Infor. Geogr.* 3: 22-44.
- Palacio P., J. L., M. T. Sánchez S., J. M. Casado I., J. Sancho C., C. Valdes M. y R. Cacho G. 2004. Indicadores para la caracterización y el ordenamiento territorial. SEMARNAT. Ciudad de México. ISBN: 970-32-1885-7.
- Palma L., D. J., J. Cisneros D., E. Moreno C. y J. A. Rincón-Ramírez. 2007. Suelos de Tabasco: su uso y manejo sustentable. Colegio de Postgraduados-Campus Tabasco, Instituto para el Desarrollo de Sistemas de Producción del Territorio Húmedo de Tabasco: Fundación Produce Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México. ISBN: 9688395528.
- Palomeque-de la Cruz, M. Á., A. Galindo-Alcántara, E. Pérez-Sánchez, A. J. Sánchez y M. J. Escalona-Maurice. 2017. Modelos geomáticos con base en transición para el análisis espacial en Villahermosa, Tabasco. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 8: 253-267. doi: <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i2.48>.
- Patarkalashvili, T. 2019. Deforestation threaten plant biodiversity and climate change. *Curr. Invest. Agric. Curr. Res.* 6: 812-817. doi: <https://doi.org/10.32474/CIACR.2019.06.000236>.
- Pineda-Jaimes, N. B., J. Bosque-Sendra, M. Gómez-Delgado y W. Plata-Rocha. 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. *Invest. Geogr.* 69: 33-52.
- Pinkus-Rendón, M. J. y A. Contreras-Sánchez. 2012. Impacto socioambiental de la industria petrolera en Tabasco: el caso de la Chontalpa. *LiminaR* 10: 122-144.
- Pontius Jr., R. G., D. Huffaker, and K. Denman. 2004. Useful techniques of validation for spatially explicit land-change models. *Ecol. Modell.* 179: 445-461. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.05.010>.
- Ramos-Reyes, R., R. Sánchez-Hernández y L. M. Gama-Campillo. 2016a. Análisis de cambios de uso del suelo en el municipio costero de Comalcalco, Tabasco, México. *Ecosist. Recur. Agropec.* 3: 151-160.
- Ramos-Reyes, R., J. Zavala-Cruz, L. M. Gama-Campillo, D. Pech-Pool y M. A. Ortiz-Pérez. 2016b. Indicadores geomorfológicos para evaluar la vulnerabilidad por inundación ante el ascenso

- del nivel del mar debido al cambio climático en la costa de Tabasco y Campeche, México. *Bol. Soc. Geol. Mex.* 68: 581-598.
- Ramos-Reyes, R., M. Á. Palomeque-de la Cruz, H. J. Megia-Vera y P. López-Benítez. 2019. Modelación del cambio de uso del suelo en la Zona Costera: Cuauhtemotzin-El Pailebot, Tabasco, México. *Rev. Urbanismo* 41: 1-15. doi: <https://doi.org/10.5354/0717-5051.2019.51452>.
- Reynoso-Santos, R., J. R. Valdez-Lazalde, M. J. Escalona-Maurice, H. M. de los Santos-Posadas y M. J. Pérez-Hernández. 2016. Cadenas de Markov y autómatas celulares para la modelación de cambio de uso de suelo. *Rev. Ing. Hidrául. Amb.* 37: 72-81.
- Rosa, I. M. D., M. J. Smith, O. R. Wearn, D. Purves, and R. M. Ewers. 2016. The environmental legacy of modern tropical deforestation. *Current Biol.* 26: 2161-2166. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cub.2016.06.013>.
- Rosete-Vergés, F. A., J. L. Pérez-Damián, M. Villalobos-Delgado, E. N. Navarro-Salas, E. Salinas-Chávez y R. Remond-Noa. 2014. El avance de la deforestación en México 1976-2007. *Madera Bosques* 20: 21-35. doi: <https://doi.org/10.21829/myb.2014.201173>.
- Sahagún-Sánchez, F. J. y H. Reyes-Hernández. 2018. Impactos por cambio de uso de suelo en las áreas naturales protegidas de la región central de la Sierra Madre Oriental, México. *CienciaUAT* 12: 6-21.
- Sánchez, A. J., M. Á. Salcedo, A. A. Macossay, Y. Feria, L. Vázquez, N. Ovando y L. Rosado. 2012. Calidad ambiental de la laguna urbana la Pólvara en la cuenca del río Grijalva. *Tecnol. Cienc. Agua* 3: 143-152.
- Sánchez-Munguía, A. 2005. Uso del suelo agropecuario y deforestación en Tabasco 1950-2000. UJAT. Villahermosa, Tabasco, México. ISBN: 9685748675.
- Seingier, G., I. Espejel y J. L. F. Almada. 2009. Cobertura vegetal y marginación en la costa mexicana. *Invest. Amb. Cienc. Polít. Públ.* 1: 54-69.
- SERNAPAM (Secretaría de Energía, Recursos Naturales y Protección Ambiental). 2015. Programa de fortalecimiento y capacitación en los municipios en relación a capacidades y acciones de adaptación ante el cambio climático y vulnerabilidad en Tabasco. SERNAPAM-ECOSUR. Villahermosa, Tabasco, México.
- Stefanov, W. L., M. S. Ramsey, and P. R. Christensen. 2001. Monitoring urban land cover change: An expert system approach to land cover classification of semiarid to arid urban centers. *Remote Sens. Environ.* 77: 173-185. doi: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00204-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00204-8).
- Sugden, A. M. 2018. Mapping global deforestation patterns. *Science* 361: 1083. doi: <https://doi.org/10.1126/science.361.6407.1083-e>.
- Thapa, R. B. and Y. Murayama. 2011. Urban growth modeling of Kathmandu metropolitan region, Nepal. *Comp. Environ. Urban Syst.* 35: 25-34. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2010.07.005>.
- Velázquez, A., J. F. Mas, J. R. Díaz G., R. Mayorga S., P. C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco, E. Excurra y J. L. Palacio. 2002. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecol.* 62: 21-37.
- Veldkamp, A. and E. F. Lambin. 2001. Predicting land use change. *Agric. Ecosyst. Environ.* 85: 1-6. doi: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00199-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00199-2).
- Zheng, H. W., G. Q. Shen, H. Wang, and J. Hong. 2015. Simulating land use change in urban renewal areas: A case study in Hong Kong. *Habitat Int.* 46: 23-34. doi: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2014.10.008>.