

# Analysis of land use change in an urban ecosystem in the drainage area of the Grijalva river, Mexico

Análisis del cambio de uso del suelo en un ecosistema urbano en la zona de drenaje del río Grijalva, México

Miguel Á. Palomeque-De la Cruz<sup>1</sup>; Adalberto Galindo-Alcántara<sup>1\*</sup>; Miguel J. Escalona-Maurice<sup>2</sup>; Silvia del C. Ruiz-Acosta<sup>3</sup>; Alberto J. Sánchez-Martínez<sup>1</sup>; Eunice Pérez-Sánchez<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas. km 0.5 carretera Villahermosa-Cárdenas entronque a Bosques de Saloya. C. P. 86150. Villahermosa Tabasco, México. aga2003a@hotmail.com, Tel.: +52 (993) 1779014 (\*Corresponding author).

<sup>2</sup>Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. km 36.5 carretera México-Texcoco. C. P. 56230. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

<sup>3</sup>Instituto Tecnológico de la Zona Olmeca. Prolongación Ignacio Zaragoza s/n. C. P. 86720. Villa Ocuilzapotlán, Centro, Tabasco. México.

## Abstract

The land use change was analyzed based on the effect of the urban growth of Villahermosa city, Tabasco, on arboreal vegetation and aquatic ecosystems. A multitemporal analysis was carried out using the Land Change Modeler for Ecological Sustainability and the CrossTab module of IDRISI Selva<sup>®</sup> software and change rates were calculated. According to the results, for almost three decades (1984-2008), a total of 4,008 ha of land occupied by arboreal vegetation and 289 ha of wetland were lost, due to the accelerated growth of grasslands and urban areas. Stochastic transition models (Markov chains and cellular automata) projected a loss of 1,171 ha of arboreal vegetation and 247 ha of wetland between 2008 and 2030. This trend is likely to be sustained by the relentless growth of grassland and urban area.

**Keywords:** Woodlands, wetlands, urban growth, Markov chain, cellular automata.

## Resumen

El cambio de uso del suelo de la ciudad de Villahermosa, Tabasco, se analizó con base en el efecto provocado por el crecimiento urbano sobre la vegetación arbórea y los ecosistemas acuáticos. Se hizo un análisis multitemporal mediante el modelador de cambio de uso del suelo (Land Change Modeler for Ecological Sustainability) y el módulo CrossTab del software IDRISI Selva<sup>®</sup> y se calcularon tasas de cambio. De acuerdo con los resultados, durante casi tres décadas (1984-2008) se perdieron 4,008 ha de suelo ocupado por vegetación arbórea y 289 ha de humedales, debido al crecimiento acelerado de los pastizales y la zona urbana. Mediante modelos de transición estocástica (cadenas de Markov y autómatas celulares) se proyectó una pérdida de 1,171 ha de vegetación arbórea y 247 ha de humedales entre el periodo 2008 y 2030. Es probable que esta tendencia se mantenga por el incesante crecimiento del pastizal y la zona urbana.

**Palabras clave:** Vegetación arbórea, humedales, crecimiento urbano, cadenas de Markov, autómatas celulares.

## Introduction

Urbanization, one of the main socio-environmental processes, is conceptualized in general terms as the transformation of land into urban environments (Angeoletto et al., 2015). Urbanization causes desertification, deforestation, loss of biodiversity and emission of greenhouse gases that contribute to climate change. Land change by urban growth accounts for about 47 % of the planet, only Africa accounts for 65 % of the world's degraded soil (Biro, Pradhan, Buchroithner, & Makeschin, 2013). In Europe and Asia, land use change has contributed to landscape fragmentation, and in America, large forest coverages have been lost and about 50 % of wetland areas have disappeared (Mitsch, Goseelink, & Anderson, 2009).

Forests, deserts and wetlands near urban ecosystems are deteriorating in Mexico; for example, in Mexico City, an extensive area of natural reserves has become an urban area and more than 30 % of wetlands have disappeared (Torres-Vera, Prol-Ledesma, & García-López, 2009; Zepeda-Gómez, Nemiga, Lot-Helgueras, Madrigal-Uribe, 2012). In the decade of the 70's, the beginning of the oil boom was added to the economic impulse and consequent urban growth in the southeastern cities of the country, including Villahermosa (Bazant, 2010). In this field, from 1993 to 2007, the forest area decreased from 36 to 9 % in the basin of Grijalva-Usumacinta (Kolb & Galicia 2012). The loss of vegetation and wetland cover in the basin has been linked to city growth, deforestation for livestock use, and logging and oil exploitation (Kolb, Mas, & Galicia, 2013; Perevochtchikova & Lezama, 2010). In the case of Villahermosa, urban expansion was based on the filling and fragmentation of wetlands (Díaz-Perera, 2014).

The basin of the rivers Grijalva-Usumacinta, located in the coastal plain of the southern Gulf of Mexico, covers 91,345 km<sup>2</sup> and represents 4.7 % of the country (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2012). Since the seventeenth century, the low drainage area of the basin of the Grijalva River has been transformed by agricultural activities and modifications to the river network (Navarro & Toledo, 2004; Salazar, 2002). Since 1970, land use change has altered natural flood cycles, with consequent disruption of water volumes in rivers and areas of temporary flooding, biogeochemical cycles and trophic dynamics of wetlands, leading to fragmentation and loss of habitat, as well as to the decline of biodiversity and society-environment relations (Pinkus-Rendón & Contreras-Sánchez, 2012; Sánchez et al., 2015).

The city of Villahermosa, capital of the state of Tabasco, is one of the four most important urban ecosystems in the drainage zone of the Grijalva River.

## Introducción

La urbanización, uno de los principales procesos socioambientales, se conceptualiza en términos generales como la transformación del suelo en ambientes urbanos (Angeoletto et al., 2015). La urbanización causa desertificación, deforestación, pérdida de la biodiversidad y emisión de gases invernadero que contribuyen al cambio climático. La conversión del suelo por el crecimiento urbano abarca alrededor de 47 % del planeta, tan sólo África representa 65 % del suelo degradado en el mundo (Biro, Pradhan, Buchroithner, & Makeschin, 2013). En Europa y Asia, el cambio de uso del suelo ha contribuido a la fragmentación del paisaje, y en América, grandes coberturas de selvas se han perdido y alrededor de 50 % de las superficies de humedales han desaparecido (Mitsch, Goseelink, & Anderson, 2009).

En México se están deteriorando bosques, desiertos y humedales cercanos a los ecosistemas urbanos; por ejemplo, en la Ciudad de México, una superficie extensa de reservas naturales se ha transformado en zona urbana y más de 30 % de los humedales han desaparecido (Torres-Vera, Prol-Ledesma, & García-López, 2009; Zepeda-Gómez, Nemiga, Lot-Helgueras, Madrigal-Uribe, 2012). En la década de los años 70, el inicio del *boom* petrolero se sumó al impulso económico y consecuente crecimiento urbano en las ciudades del sureste del país, entre ellas Villahermosa (Bazant, 2010). En este ámbito, de 1993 a 2007, el área de las selvas disminuyó de 36 a 9 % en la cuenca del Grijalva-Usumacinta (Kolb & Galicia, 2012). La pérdida de la cobertura vegetal y de los humedales en la cuenca se ha relacionado con el crecimiento de la ciudad, la deforestación con fines de uso ganadero y la explotación forestal y petrolera (Kolb, Mas, & Galicia, 2013; Perevochtchikova & Lezama, 2010). En el caso de Villahermosa, la expansión urbana se fundamentó en el relleno y fragmentación de humedales (Díaz-Perera, 2014).

La cuenca de los ríos Grijalva-Usumacinta, localizada en la planicie costera del sur del golfo de México, tiene una extensión de 91,345 km<sup>2</sup> y representa 4.7 % del país (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2012). Desde el siglo XVII, la zona baja de drenaje de la cuenca del río Grijalva fue transformada por las actividades agropecuarias y las modificaciones a la red fluvial (Navarro & Toledo, 2004; Salazar, 2002). A partir de 1970, el cambio de uso del suelo modificó los ciclos naturales de inundación, con el consecuente trastorno de los volúmenes de agua en los ríos y zonas de anegación temporal, ciclos biogeoquímicos y dinámica trófica de los humedales, lo que llevó a la fragmentación y pérdida del hábitat, así como a la disminución de la biodiversidad y las relaciones sociedad-ambiente (Pinkus-Rendón & Contreras-Sánchez, 2012; Sánchez et al., 2015).

The presence of economic activities such as agriculture and oil exploitation, has allowed it to maintain the state's political status. Villahermosa has 13 riverine lagoon ecosystems related to the surrounding rivers of Mezcalapa Viejo, Carrizal and Sierra-Grijalva (Sánchez-Colón, Flores-Martínez, Cruz-Leyva, & Velázquez, 2009). The model of excessive growth of the urban ecosystem is associated with the modification of the physiography and the increase of the vulnerability of the floods. In adjacent urban and suburban areas, both wetlands and their temporary floodplains or associated marshes were dried up, rivers changed, floodplains were devastated and forests were deforested (CONAGUA, 2012). However, the lack of data on the measurement of changes in tree cover and wetlands still exists, despite the fact that this information is relevant to support models of land use change that allow to mitigate their loss or seek rehabilitation to restore environmental services and benefits.

The spatial-temporal dynamics estimate the distribution of the change of natural coverages and artificial uses to identify those that show greater environmental pressure (Velázquez et al., 2002); therefore, the study of dynamics is very important for environmental impact assessment and for environmental planning strategies. Land-use change modelers, Markov chains and cellular automata are useful transition models for detecting the factors and consequences involved in land-use change, and predicting spatial scenarios (Eastman, 2012; Reynoso-Santos, Valdez-Lazalde, Escalona-Maurice, De los Santos-Posadas, & Pérez-Hernández, 2016).

The aim of this study was to evaluate the spatial-temporal dynamics in the city of Villahermosa during the period 1984-2008, to estimate the distribution of arboreal vegetation and wetlands. These coverages were selected because they are subject to greater environmental pressure due to urban growth. Based on this, a prospective scenario (2030) based on Markov chains and cellular automata was built.

## Materials and methods

### Study area

The study was carried out at the boundary of urban influence of the city of Villahermosa (92° 55' O and 17° 59' N), which has an area of 20,655 ha and is located in the lower part of the drainage zone of the Grijalva river. The river of the Sierra drains by the east and the carrizal River borders the north. The city has an average height of 10 m and a minimum relief dominated by low floodplain areas and some hills in the East (CONAGUA, 2012).

### Database development

Thematic layers of land use were created in vector format in 1984, 2000 and 2008 (1: 75,000, 1: 20,000, 1: 10,000),

La ciudad de Villahermosa, capital del estado de Tabasco, es uno de los cuatro ecosistemas urbanos más importantes de la zona de drenaje del río Grijalva. La presencia de actividades económicas como la agropecuaria y la petrolífera, le ha permitido mantener el estatus político de capital del estado. En Villahermosa subsisten 13 ecosistemas lagunares fluviales relacionados con los ríos Mezcalapa Viejo, Carrizal y Sierra-Grijalva que la rodean (Sánchez-Colón, Flores-Martínez, Cruz-Leyva, & Velázquez, 2009). El modelo de crecimiento desmedido del ecosistema urbano se asocia a la modificación de la fisiografía y al aumento de la vulnerabilidad de las inundaciones. En las zonas urbanas y suburbanas adyacentes se desecaron tanto los humedales como sus zonas de anegación temporal o pantanos asociados, el curso de los ríos se modificó, los lomeríos se devastaron y las selvas se deforestaron (CONAGUA, 2012). No obstante, la carencia de datos sobre la medición de los cambios de cobertura de la vegetación arbórea y de los humedales aún subsiste, a pesar de que esta información es relevante para sustentar modelos de cambio de uso del suelo que permitan mitigar su pérdida o buscar su rehabilitación para restablecer servicios y beneficios ambientales.

La dinámica espacio-temporal estima la distribución del cambio de coberturas naturales y usos artificiales para identificar las que presentan mayor presión ambiental (Velázquez et al., 2002); por tanto, el estudio de la dinámica es primordial para la evaluación del impacto ambiental y para las estrategias de planificación ambiental. El modelador de cambio de uso del suelo, las cadenas de Markov y los autómatas celulares son modelos de transición útiles para detectar los factores y las consecuencias que intervienen en el cambio de uso del suelo, y predecir escenarios espaciales (Eastman, 2012; Reynoso-Santos, Valdez-Lazalde, Escalona-Maurice, De los Santos-Posadas, & Pérez-Hernández, 2016).

El objetivo de este trabajo fue evaluar la dinámica espacio-temporal en la ciudad de Villahermosa durante el periodo 1984-2008, para estimar la distribución de la vegetación arbórea y los humedales. Estas coberturas se seleccionaron por estar sujetas a mayor presión ambiental por el crecimiento urbano. A partir de ello se construyó un escenario prospectivo (2030) basado en cadenas de Markov y autómatas celulares.

## Materiales y métodos

### Área de estudio

El estudio se realizó en el límite de influencia urbana de la ciudad de Villahermosa (92° 55' O y 17° 59' N), que tiene una superficie de 20,655 ha y se ubica en la parte baja de la zona de drenaje del río Grijalva. El río de La Sierra drena por el este y el Carrizal bordea el norte. La ciudad tiene una altura promedio de 10 m y un

digitized from black and white aerial photographs using ArcGis® 10.2.2 software (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2016). In order to correct inconsistencies in the pixel size, a transformation was made by means of cartographic restitution (RMS < 0.5, WGS 84), based on the image of 2008 and using the PCI Geomatics® V9.1 software (PCI Geomatics Enterprises, 2003). A total of seven categories of land use were established: (1) arboreal vegetation, (2) wetlands, (3) grassland, (4) wasteland, (5) industrial land, (6) roads and (7) urban land. Along with the digitization, a field study was carried out to verify the defined classes.

### Land Use Change Analysis

The multitemporal analysis was performed using the Land Change Modeler for Ecological Sustainability and the CrossTab module of the IDRISI Selva® software, generating a cross tabulation matrix (Eastman, 2012). The periods considered covered from 1984 to 2000 and from 2000 to 2008. The matrices obtained were validated with the Kappa statistic (K) = 0.8963 (1984-2000) and Kappa (K)=0.9033 (2000-2008), close to 1.0000, generating a reliable analysis of spatial dynamics. The results include the summary of the matrices showing the surface of each category in comparison with others, in terms of gains, losses and contributions among categories (Eastman, 2012).

### Change rates

Land use change rates were calculated using the formula of Palacio-Prieto et al.(2004):

$$Td = [(S_2 / S_1) (1 / n) - 1] * 100$$

where:

Td = Annual change rate (%)

S<sub>1</sub> = Area covered at the beginning of the period (ha)

S<sub>2</sub> = Area covered at the end of the period (ha)

n = Number of years in the period

### Projection of land use change (2030)

The probabilities and spatial scenarios of land use change were projected using the combined techniques of transition models: Markov chains and cellular automata. Markov chains were used to calculate the probability of change from one pixel to another and to generate a transition probability matrix and a transition area matrix (Eastman, 2012; Reynoso-Santos et al., 2016). For this calculation, the land use maps of 1984 (Figure 1) and of 2008 (Figure 2) were used, and the MARKOV module of IDRISI Selva® software was used, regarding a 22 year interval (2030). The result was a transition probability matrix and a matrix of transition

relieve mínimo dominado por zonas bajas inundables y algunos lomeríos en la zona Este (CONAGUA, 2012).

### Construcción de la base de datos

Las capas temáticas de uso del suelo se crearon en formato vectorial de 1984, 2000 y 2008 (1: 75,000, 1: 20,000, 1: 10,000), digitalizadas a partir de fotografías aéreas en blanco y negro mediante el software ArcGis® 10.2.2 (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2016). Para corregir inconsistencias en el tamaño del pixel, se realizó una transformación por medio de restitución cartográfica (RMS < 0.5, WGS 84), tomando como base la imagen de 2008 y empleando el software PCI Geomatics® V9.1 (PCI Geomatics Enterprises, 2003). Se establecieron siete categorías de uso del suelo: 1) vegetación arbórea, 2) humedales, 3) pastizal, 4) terrenos baldíos, 5) industrial, 6) carreteras y 7) urbano. A la par de la digitalización se realizó un trabajo de campo para verificar las clases definidas.

### Análisis del cambio de uso del suelo

El análisis multitemporal se realizó mediante el modelador de cambio de uso del suelo (Land Change Modeler for Ecological Sustainability) y el módulo CrossTab del software IDRISI Selva®, generando una matriz de tabulación cruzada (Eastman, 2012). Los periodos considerados abarcaron de 1984 a 2000 y de 2000 a 2008. Las matrices resultantes se validaron con el estadístico Kappa (K) = 0.8963 (1984-2000) y Kappa (K) = 0.9033 (2000-2008), cercanas a 1.0000, generando un análisis confiable de la dinámica espacial. Los resultados incluyen el resumen de las matrices que muestra la superficie de cada categoría en comparación con otras, en términos de ganancias, pérdidas y contribuciones entre categorías (Eastman, 2012).

### Tasas de cambio

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

$$Td = [(S_2 / S_1) (1 / n) - 1] * 100$$

donde:

Td = Tasa de cambio anual (%)

S<sub>1</sub> = Área cubierta al inicio del periodo (ha)

S<sub>2</sub> = Área cubierta al final del periodo (ha)

n = Número de años del periodo

### Proyección del cambio de uso del suelo (2030)

Las probabilidades y escenarios espaciales del cambio de uso del suelo se proyectaron con las técnicas combinadas de los modelos de transición: cadenas de



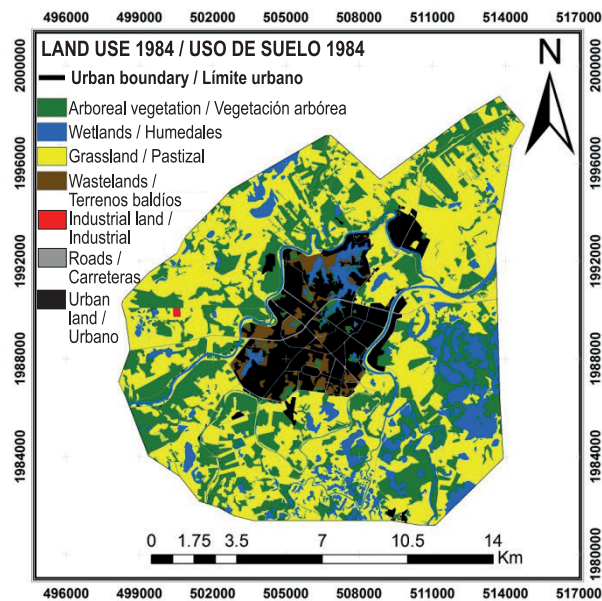


Figure 1. Land use map of the city of Villahermosa, Tabasco (1984). Scale 1:10,000.

Figura 1. Mapa de uso de suelo de la ciudad de Villahermosa, Tabasco (1984). Escala 1:10,000.

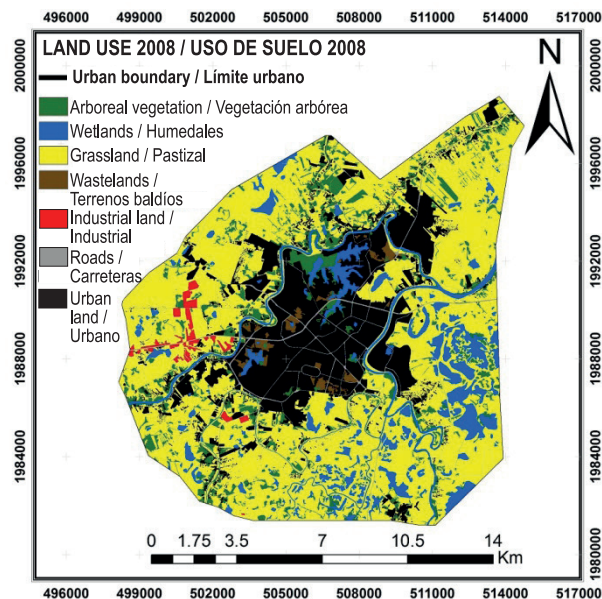


Figure 2. Land use map of the city of Villahermosa, Tabasco (2008). Scale 1:10,000.

Figura 2. Mapa de uso de suelo de la ciudad de Villahermosa, Tabasco (2008). Escala 1:10,000.

areas, with a collection of maps representing transition areas for the seven land use categories in 2030.

Subsequently, the map of 2008 (Figure 2), the transition matrix and the collection of maps of transition areas of 2030, generated with MARKOV, were used as variables to run the cellular automata module (CA-MARKOV) of the software IDRISI Selva® (Eastman, 2012; Reynoso-Santos et al., 2016), to generate the map of 2030 (Figure 3). The suitability of the model was evaluated through a comparison of similarity between the image of 2008 and the projected map of 2030, using the

Markov y autómatas celulares. Las cadenas de Markov se utilizaron para calcular la probabilidad de cambio de un pixel a otro y generar una matriz de probabilidad de transición y otra de áreas de transición (Eastman, 2012; Reynoso-Santos et al., 2016). Para este cálculo se emplearon los mapas de uso de suelo de 1984 (Figura 1) y de 2008 (Figura 2), y se ejecutó el módulo MARKOV del software IDRISI Selva®, considerando un intervalo de 22 años (2030). El resultado fue una matriz de probabilidad de transición y una matriz de áreas de transición, con una colección de mapas que representan las áreas de transición para las siete categorías de uso del suelo en 2030.

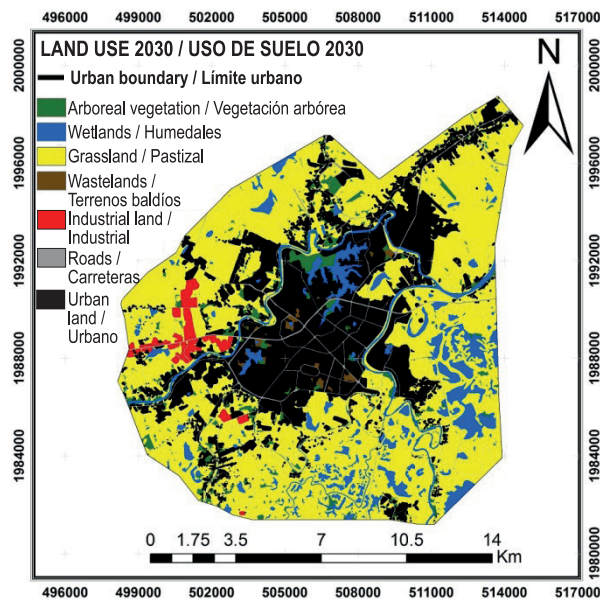


Figure 3. Land use map of the city of Villahermosa (projection 2030). Scale 1:10,000.

Figura 3. Mapa de uso de suelos de la ciudad de Villahermosa (proyección 2030). Escala 1:10,000.

VALIDATE module. The Kappa statistic indicated that Standard K = 0.9081, Kno = 0.9488 and Klocalition = 0.9630 were close to 1.0000; showing precision for the scenarios building. Both images were intersected in the Land Change Modeler and CrossTab modules to obtain the change matrices; thus, gain, loss and contribution between coverages for the map of 2008 and the scenario of 2030 were calculated.

## Results and discussion

### Change analysis of 1984-2000-2008

Table 1 reports the land use areas and change rates by period analyzed. Land use in 1984 was distributed as follows: 44.5 % of the land was occupied by grassland, while 28.6 % and 12.3 % corresponded to arboreal vegetation and wetlands, respectively. By contrast, the urban area occupied 10.6 % of the territory. Figure 1 shows the land use map in Villahermosa of that year, in which it is observed that most of the arboreal vegetation was close to aquatic ecosystems in non-urbanized areas.

In the first period of analysis (1984-2000), arboreal vegetation lost 2,384 ha with a high rate of change of -3.18 %; wetlands lost 76 ha with a change rate of -0.19 %. In contrast, grassland and urban area increased by 1,507 and 942 ha, with change rates of 0.95 and 2.27 %, respectively. Sánchez-Munguía (2005) found that in Tabasco, from 1950 to 2000, about 83,518 ha of wetlands had been lost at a rate of 3,341 ha-year<sup>-1</sup> and that in Villahermosa, the urban advance of 2,296 ha between 1990 and 2000 invaded lagoons and marshes, and freshwater wetlands and cattail vegetation that functioned as regulating vessels, were removed.

Posteriormente, el mapa de 2008 (Figura 2), la matriz de transición y la colección de mapas de áreas de transición del año 2030, generados con MARKOV, se emplearon como variables para ejecutar el módulo de autómatas celulares (CA-MARKOV) del software IDRISI Selva® (Eastman, 2012; Reynoso-Santos et al., 2016), para generar el mapa de 2030 (Figura 3). La idoneidad del modelo se evaluó a través de una comparación de similitud entre la imagen de 2008 y el mapa proyectado de 2030, empleando el módulo VALIDATE. El estadístico Kappa señaló que K Estándar = 0.9081, Kno = 0.9488 y Klocalition = 0.9630 fueron cercanas a 1.0000; mostrando precisión para la construcción de escenarios. Ambas imágenes se cruzaron en los módulos Land Change Modeler y CrossTab, para obtener las matrices de cambio; de este modo se calcularon la ganancia, pérdida y contribución entre coberturas para el mapa de 2008 y el escenario 2030.

## Resultados y discusión

### Análisis de cambios 1984-2000-2008

El Cuadro 1 reporta las superficies de uso de suelo y las tasas de cambio por periodo analizado. El uso del suelo en 1984 se distribuía de la siguiente manera: 44.5 % de la superficie lo ocupaba el pastizal, en tanto que a la vegetación arbórea y a los humedales les correspondía 28.6 y 12.3 %, respectivamente. Por el contrario, la zona urbana ocupaba 10.6 % del territorio. La Figura 1 muestra el mapa de uso de suelo en Villahermosa del año en cuestión, en el cual se observa que la mayor parte de la vegetación arbórea estaba próxima a los ecosistemas acuáticos en zonas no urbanizadas.

Table 1. Land use change and change rate (CR) in Villahermosa, Tabasco.  
Cuadro 1. Cambios de uso del suelo y tasas de cambio (TC) en Villahermosa, Tabasco.

Category/ Categoría	Area 1984/ Superficie 1984		2000		2008		Projection 2030/ Proyección 2030		Period 1984-2000/ Periodo 1984-2000		Period 2000-2008/ Periodo 2000-2008		Period 1984-2008/ Periodo 1984-2008		Period 2008-2030/ Periodo 2008-2030	
	Area (ha)/ Superficie (%)	Area (ha)/ Superficie (%)	Area (ha)/ Superficie (%)	Area (ha)/ Superficie (%)	Area (ha)/ Superficie (%)	Area (ha)/ Superficie (%)	Area (ha)/ Superficie (%)	Area (ha)/ Superficie (%)	Area (ha)/ Superficie (%)	CR (%) / TC (%)	Area (ha)/ Superficie (ha)	CR (%) / TC (%)	Area (ha)/ Superficie (ha)	CR (%) / TC (%)	Area (ha)/ Superficie (ha)	CR (%) / TC (%)
Arboreal vegetation/ Vegetación arbórea	5,901	28.6	3,517	17	1,893	9.2	722	3.5	2,384	-3.18	1,624	-7.45	4,008	-4.63	1,171	
Wetlands/ Humedales	2,533	12.3	2,457	11.9	2,244	10.9	1,997	9.7	76	-0.19	213	-1.13	289	-0.50	247	
Grassland/ Pastizal	9,192	44.5	10,699	51.8	11,239	54.4	10,922	52.9	-1,507	0.95	-540	0.62	-2,047	0.84	317	
Wastelands/ Terrenos baldíos	465	2.2	407	2	203	1	84	0.4	58	-0.82	204	-8.36	262	-3.40	119	
Industrial land/ Industrial	10	0.05	64	0.3	184	0.9	325	1.6	-54	12.17	-120	14.08	-174	12.81	-141	
Roads/ Carreteras	373	1.8	387	1.9	435	2.1	476	2.3	-14	0.24	-48	1.46	-62	0.65	-41	
Urban land/ Urbano	2,182	10.6	3,124	15.1	4,458	21.6	6,137	29.7	-942	2.27	-1,334	4.55	-2,276	3.02	-1,679	
Total	20,655	100	20,655	100	20,655	100	20,655	100								

In the period of 2000-2008, the loss of areas of arboreal vegetation (1,624 ha) and wetlands (213 ha) increased compared to the previous period, with wide change rates (-7.45 and -1.13 %, respectively), while grassland (540 ha) and urban areas (1,334 ha) continued to occupy more area, with change rates of 0.62 and 1.46 %, respectively (Table 1).

During the 24 years (1984-2008), arboreal vegetation and wetlands lost 4,008 and 289 ha, respectively. In contrast, grassland and urban areas increased by 2,047 and 2,276 ha (Table 1), respectively, being the greatest impacts of the last three decades reflected in their spatial-temporal dynamics. In the period 1984-2008, the rate of land use change of the arboreal vegetation was of -4.63 %, being greater than that recorded in the Grijalva-Usumacinta basin and country. Kolb and Galicia (2012) observed that the rate of deforestation in the Grijalva-Usumacinta basin was 0.90 % during 1993 and 2007, and reports from the FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2015) reported deforestation rates of -0.3 % in Mexico during 1990 and 2015.

The analysis of land use change shows that Villahermosa is expanding uncontrollably in the face of poor sustainable development, from being a compact city it transformed into a sectorial perimeter and then into a fragmented city, which is common in Latin American cities (Bähr & Borsdorf, 2005). The city shows a growth pattern associated with industrialization, land use regulations, regional economy, population movements, demand for agricultural products and political environment providing total control to the real estate sector and socio-cultural processes (Kolb et al., 2013; Linard, Tatem, & Gilbert, 2013). The territory also has the influence of the relief, the low slope and the roads that facilitate the establishment of new population centers that demand urban infrastructure (Gutiérrez, Condeço-Melhorado, & Martín, 2010; Kolb et al., 2013).

Table 2 reports the losses and gains of surface of the seven categories analyzed in the periods of 1984-2000 and 2000-2008. In the period of 1984-2000, arboreal vegetation gained 0.08 % of its surface area, but it was the category that provided more areas (3.65 %) to other land uses. Grasslands and the urban area were the categories that gained more areas (3.31 and 1.44 %, respectively), although the former also lost 1.05 %, while the latter showed no loss. Of the total wetland area, 0.18 % changed to other uses, while roads gained 0.03 % of their area. Between 2000 and 2008, the pressure on wetlands intensified, as their area decreased by 0.74 %. Similarly, grassland loss (3.31 %) was higher, although 2.26 % of its area was restored. The arboreal vegetation lost 2.61 %, while other categories such as industrial

En el primer periodo de análisis (1984-2000), la vegetación arbórea perdió 2,384 ha con una elevada tasa de cambio de -3.18 %; en el caso de los humedales fueron 76 ha con una tasa de cambio de -0.19 %. En contraste, el área de pastizal y la zona urbana aumentaron 1,507 y 942 ha, con tasas de cambio de 0.95 y 2.27 %, respectivamente. Sánchez-Munguía (2005) determinó que, en Tabasco, del año 1950 al 2000, se habían perdido alrededor de 83,518 ha de humedales a un ritmo de 3,341 ha·año<sup>-1</sup> y que en Villahermosa, el avance urbano de 2,296 ha entre 1990 y 2000 invadió lagunas y pantanos, y se eliminaron popales y tulares que funcionaban como vasos reguladores

En el periodo 2000-2008, la pérdida de áreas de vegetación arbórea (1,624 ha) y de humedales (213 ha) incrementó en comparación con el periodo anterior, con amplias tasas de cambio (-7.45 y -1.13 %, respectivamente), mientras que el pastizal (540 ha) y la zona urbana (1,334 ha) continuaron ocupando más áreas, con tasas de cambio de 0.62 y 1.46 %, respectivamente (Cuadro 1).

Durante los 24 años (1984-2008), la vegetación arbórea y los humedales perdieron 4,008 y 289 ha, respectivamente. En cambio, el pastizal y la zona urbana aumentaron 2,047 y 2,276 ha (Cuadro 1), respectivamente, siendo los mayores impactos de las últimas tres décadas reflejados en su dinámica espacio-temporal. En el periodo 1984-2008, la tasa de cambio de uso del suelo de la vegetación arbórea fue de -4.63 %, siendo mayor que lo registrado en la cuenca Grijalva-Usumacinta y el país. Kolb y Galicia (2012) observaron que la tasa de deforestación en la cuenca Grijalva-Usumacinta fue de 0.90 % durante 1993 y 2007, y los informes de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2015) reportaron tasas de deforestación en México de -0.3 % durante 1990 y 2015.

El análisis del cambio de uso del suelo demuestra que Villahermosa se está expandiendo de forma incontrolable ante un desarrollo sostenible deficiente; de ser una ciudad compacta se transformó en un perímetro sectorial y después en una urbe fragmentada, lo cual es común en las ciudades latinoamericanas (Bähr & Borsdorf, 2005). La ciudad muestra un patrón de crecimiento asociado con la industrialización, reglamentos de uso del suelo, economía regional, movimientos de población, demanda de productos agrícolas y entorno político que dan control total al sector inmobiliario y los procesos socioculturales (Kolb et al., 2013; Linard, Tatem, & Gilbert, 2013). El territorio también presenta la influencia del relieve, de la escasa pendiente y de las carreteras que facilitan el establecimiento de nuevos centros de población que demandan infraestructura urbana (Gutiérrez, Condeço-Melhorado, & Martín, 2010; Kolb et al., 2013).



**Table 2. Loss and gain of area (1984-2000 and 2000-2008) per category analyzed in Villahermosa, Tabasco.****Cuadro 2. Pérdidas y ganancias de superficie (1984-2000 y 2000-2008) por categoría analizada en Villahermosa, Tabasco.**

Category/Categoría	Area 1984/ Superficie 1984	Area 2000/ Superficie 2000	Gains/Ganancias		Losses/Pérdidas	
	(ha)	(ha)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Arboreal vegetation/ Vegetación arbórea	5,901	3,517	51	0.08	-2,436	-3.65
Wetlands/Humedales	2,533	2,457	41	0.06	-117	-0.18
Grassland/Pastizal	9,192	10,699	2,210	3.31	-703	-1.05
Wasteland/ Terrenos baldíos	465	407	83	0.12	-140	-0.21
Industrial land/ Industrial	10	64	54	0.08	0	0
Roads/Carreteras	373	387	19	0.03	-5	-0.01
Urban land/Urbano	2,182	3,124	959	1.44	-17	-0.03

Categoría/Categoría	Area 2000/ Superficie 2000	Area 2008/ Superficie 2008	Gains/Ganancias		Losses/Pérdidas	
	(ha)	(ha)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Arboreal vegetation/ Vegetación arbórea	3,517	1,893	116	0.17	-1,741	-2.61
Wetlands/Humedales	2,457	2,244	0	0	-215	-0.74
Grassland/Pastizal	10,699	11,239	1,507	2.26	-967	-3.31
Wasteland/ Terrenos baldíos	407	203	22	0.03	-226	-0.78
Industrial land/ Industrial	64	184	121	0.18	-1	0
Roads/Carreteras	388	435	54	0.08	-6	-0.01
Urban land/Urbano	3,124	4,458	1,343	2.01	-8	-0.01

land, roads and urban land recorded an overall growth equivalent to 2.27 % of the surface.

Table 3 shows the surface contributions among the seven categories in the two periods evaluated. In the first period (1984-2000), 38 ha of arboreal vegetation were transformed into wetlands and 2,011 ha into grassland. In addition, another 306 ha of arboreal vegetation contributed to the growth of urban areas, industrial areas and roads, and only 29 ha remained as wasteland. Although wetlands gained 38 ha of arboreal vegetation, they gave 113 ha to the grasslands. This last category added another 2,011 ha coming from the arboreal vegetation, but lost 528 ha because of the growth of urban areas, industrial areas and roads. The urban area required 288 ha, 528 ha and 123 ha of arboreal vegetation, grassland and wasteland, respectively. In the second period (2000-2008), arboreal vegetation continued to provide areas to grassland

El Cuadro 2 reporta las pérdidas y ganancias de superficie de las siete categorías analizadas en los periodos 1984-2000 y 2000-2008. En el periodo 1984-2000, la vegetación arbórea ganó 0.08 % de su superficie, pero fue la categoría que más áreas aportó (3.65 %) a otros usos de suelo. Los pastizales y la zona urbana fueron las categorías que más área ganaron (3.31 y 1.44 %, respectivamente), aunque los primeros también perdieron 1.05 %, mientras que la segunda no registró pérdida. Del área total de los humedales, 0.18 % transitó a otros usos, mientras que las carreteras ganaron 0.03 % de su área. Entre 2000 y 2008, la presión sobre los humedales se intensificó, ya que su área disminuyó 0.74 %. Similarmente, la pérdida de pastizales (3.31 %) fue mayor, aunque se restituyó 2.26 % de su área. La vegetación arbórea perdió 2.61 %, mientras que otras categorías como la industrial, carreteras y urbana registraron un crecimiento en conjunto equivalente a 2.27 % de la superficie.

(1,252 ha) and urban area (424 ha). On the other hand, due to the reforestation, arboreal vegetation recovered 77 ha coming from wasteland. The negative trend of the wetlands was maintained by contributing another 212 ha to grassland. This last category expanded with 1,252 ha of arboreal vegetation, although it reduced 102 ha due to the increase of the industrial area. In these eight years, 424 ha of arboreal vegetation, 762 ha of grassland and 141 ha of wasteland were urbanized.

In this study, deforestation and drastic reduction of wetlands were primarily caused by the transition to grassland for agricultural use and secondly by urbanization. These results agree with Zavala et al. (2009), who found that agricultural activities (60 %), especially grassland for livestock cattle, and urban areas (9.1 %) were dominant in Villahermosa. In the same study, the authors pointed out that 74 % of the landscape was transformed in the years 1984 and 2005 and that areas with arboreal vegetation and the wetlands occupied 25.3 and 5.2 % of the urban territory, respectively.

Between 1940-1996, 95 % of Tabasco forests were lost, due to the increase of areas for agricultural and livestock activities (Zavala & Castillo, 2007). Sánchez-Munguía (2005) analyzed the land use in Tabasco for the period of 1950-2000 and reported that the forest area distributed in ejidos and private property was 538,861 ha in 1950;

El Cuadro 3 muestra las contribuciones de superficie entre las siete categorías en los dos periodos evaluados. En el primer periodo (1984-2000), 38 ha de la vegetación arbórea se transformaron en humedales y 2,011 ha en pastizal. Asimismo, otras 306 ha de vegetación arbórea contribuyeron al crecimiento de la zona urbana, industrial y carreteras, y solo 29 ha se quedaron como terrenos baldíos. Si bien los humedales ganaron 38 ha de vegetación arbórea, cedieron 113 ha a los pastizales. Esta última categoría sumó otras 2,011 ha provenientes de la vegetación arbórea, pero perdió 528 ha por el crecimiento de la zona urbana, industrial y carreteras. La zona urbana requirió de 288 ha, 528 ha y 123 ha de vegetación arbórea, pastizal y terrenos baldíos, respectivamente. En el segundo periodo (2000-2008), la vegetación arbórea siguió aportando área al pastizal (1,252 ha) y a la zona urbana (424 ha), en cambio, debido a la reforestación, recuperó 77 ha provenientes de terrenos baldíos. La tendencia negativa de los humedales se mantuvo al contribuir con otras 212 ha al pastizal. Esta última categoría se expandió con 1,252 ha de vegetación arbórea, aunque se redujo 102 ha por el aumento de la zona industrial. En estos ocho años, 424 ha de vegetación arbórea, 762 ha de pastizal y 141 ha de terrenos baldíos fueron urbanizados.

En este estudio, la deforestación y la reducción drástica de los humedales fueron causados en primer

**Table 3. Surface contributions (1984-2000 and 2000-2008) among categories analyzed in Villahermosa, Tabasco. Cuadro 3. Contribuciones de superficie (1984-2000 y 2000-2008) entre las categorías analizadas en Villahermosa, Tabasco.**

Category/ Categoría	Contributions 1984-2000 (ha)/ Contribuciones 1984-2000 (ha)				Contributions 2000-2008 (ha)/ Contribuciones 2000-2008 (ha)				
	Arboreal vegetation/ Vegetación arbórea	Wetlands/ Humedales	Grassland/ Pastizal	Urban land/ Urbano	Category/ Categoría	Arboreal vegetation/ Vegetación arbórea	Wetlands/ Humedales	Grassland/ Pastizal	Urban land/ Urbano
Arboreal vegetation/ Vegetación arbórea	0	38	2,011	288	Arboreal vegetation/ Vegetación arbórea	0	0	1,252	424
Wetlands/ Humedales	-38	0	113	0	Wetlands/ Humedales	0	0	212	0
Grassland/ Pastizal	-2,011	-113	0	528	Grassland/ Pastizal	-1,252	-212	0	762
Wasteland/ Terrenos baldíos	-29	0	-39	123	Wasteland/ Terrenos baldíos	77	0	-14	141
Industrial land/ Industrial	-13	0	-41	0	Industrial land/ Industrial	-19	0	-102	1
Roads/Carreteras	-5	-1	-11	3	Roads/Carreteras	-5	0	-48	6
Urban land/ Urbano	-288	0	-528	0	Urban land/ Urbano	-424	0	-762	0

10 years later, the area of natural vegetation decreased to 453,411 ha; and in 1970 an accelerated deforestation initiated, leaving 146,485 ha of forest, which were reduced to 71,387 ha in 1980 and 41,079 in 1990. This decrease meant that, in 40 years, forests changed from representing 21.7 % to 1.6 % of the state area. Sánchez-Munguía (2005) linked deforestation between 1950 and 1991 with the increase in the number of heads of cattle, which was the economic activity that replaced the export of banana and other agricultural products before the oil boom (Allub & Michel, 1979).

The trend of land-use change agrees with other studies (Kolb & Galicia, 2013; Perezechchikova & Lezama, 2010; Sánchez-Munguía, 2005; Zavala & Castillo, 2007; Zavala et al., 2009) regarding the replacement of arboreal vegetation and wetlands cover by grassland and urban use; however, different surfaces and rates of change are detected due to the periods of analysis, evaluation methods and study scales. Velázquez et al. (2002) pointed out that the approaches used for the analysis of land use change are not homogeneous and, therefore, the results of different studies are varied in mapping categories and study scales. Thus, in order to compare with greater accuracy and reliability the dynamics of the different ecosystems in Mexico, it is necessary to systematize the mechanisms of evaluation, prediction and monitoring with compatible databases in categories and study scales.

Although the land use change modeler detected the accelerated growth of grassland for agricultural use against the declining of arboreal vegetation and wetlands, Sánchez-Munguía (2005) mentioned that in the last decades, there was a notable abandonment of agricultural activity in the territory, reflected in the collapse of the slaughter of cattle in the Frigorífico of Villahermosa. In spite of the decrease of this activity, the transition from grassland to arboreal vegetation by natural regeneration was not recorded; in contrast, only small reforested areas were located. Soil erosion in the Grijalva-Usumacinta basin may explain the lack of natural restoration, as 47.64 % of the area has slopes of more than 8 degrees (Sánchez-Hernández, Mendoza-Palacios, De la Cruz-Reyes, Mendoza-Martínez, & Ramos-Reyes, 2013).

In Tabasco, wetlands have deteriorated due to increased grassland, urban infrastructure and the construction of industrial areas and roads (Estrada, Barba, & Ramos, 2013), despite the fact that such coverage is valued as environmental regulators, flood damping, ecosystems hosting high biodiversity and habitat for resident and migratory species (Henny & Meutia, 2014; Hettiarachchi et al., 2014). With regard to the contamination of wetlands, the discharge of chemical products and the contribution of sediments derived from urban

lugar por la transición a pastizal de uso agropecuario y en segundo por la urbanización. Estos resultados coinciden con Zavala et al. (2009), quienes detectaron que las actividades agropecuarias (60 %), sobre todo el pastizal para ganadería de bovinos, y las urbanas (9.1 %) fueron las dominantes en Villahermosa. En el mismo estudio, los autores señalaron que 74 % del paisaje fue transformado en los años 1984 y 2005 y que las áreas con vegetación arbórea y los humedales ocuparon 25.3 y 5.2 % del territorio urbano, respectivamente.

Entre 1940-1996 se perdió 95 % de selvas de Tabasco, debido al incremento de zonas para actividades agrícolas y pecuarias (Zavala & Castillo, 2007). Sánchez-Munguía (2005) analizó el uso de suelo en Tabasco para el periodo 1950-2000 y reportó que el área de selvas distribuida en ejidos y propiedad privada era de 538,861 ha en 1950; 10 años después, el área de vegetación natural disminuyó a 453,411 ha; y en 1970 inició una deforestación acelerada que dejó 146,485 ha de selva, las cuales se redujeron a 71,387 ha en 1980 y 41,079 en 1990. Esta disminución significó que, en 40 años, las selvas pasaron de representar 21.7 % a 1.6 % de la superficie estatal. Sánchez-Munguía (2005) relacionó la deforestación del periodo 1950 a 1991 con el incremento del número de cabezas de ganado vacuno, que fue la actividad económica que sustituyó la exportación de plátano y otros productos agrícolas antes del *boom* petrolero (Allub & Michel, 1979).

La tendencia de cambio de uso del suelo coincide con otros estudios (Kolb & Galicia, 2013; Perevochtchikova & Lezama, 2010; Sánchez-Munguía, 2005; Zavala & Castillo, 2007; Zavala et al., 2009) en relación con la sustitución de las coberturas vegetación arbórea y humedales por pastizal y uso urbano; sin embargo, se detectan superficies y tasas de cambio diferentes debido a los periodos de análisis, métodos de evaluación y escalas de trabajo. Velázquez et al. (2002) señalaron que los enfoques empleados para el análisis del cambio de uso del suelo no son homogéneos y, por lo tanto, los resultados de diversos estudios son diferentes en categorías de mapeo y escalas de trabajo. Para comparar con mayor precisión y confiabilidad la dinámica de los diversos ecosistemas de México se resalta la necesidad de sistematizar los mecanismos de evaluación, predicción y seguimiento con bases de datos compatibles en categorías y escala de trabajo.

Aunque el modelador de cambio de uso del suelo detectó el crecimiento acelerado del pastizal de uso agropecuario ante la disminución de la vegetación arbórea y humedales, Sánchez-Munguía (2005) mencionó que en las últimas décadas se registró un notorio abandono de la actividad agropecuaria en el territorio, reflejado en el desplome de la matanza de cabezas de ganado en el frigorífico de Villahermosa. A

developments have led to hypertrophic conditions since the beginning of the 1990s (Goñi-Arévalo, Hernández-Pérez, Toledo-Gómez, & Pérez, 1991). These conditions have increased in Villahermosa (Hansen, Van Afferden, & Torres-Bejarano, 2007; Sánchez et al., 2012) and in other urban and coastal areas of the basin (Salcedo, Sánchez, De la Lanza, Kamplicher, & Florido, 2012).

#### Projection of the probabilities of land use change (2030)

By 2030, the replacement of arboreal vegetation by grasslands recorded 0.52 probability, which was followed by 0.13 related to urban growth (Table 4). In this sense, wetlands will disappear to become grasslands with a probability of 0.11; however, grassland will in turn be replaced by the urban area with a probability index of 0.11 (Table 4). Wasteland have a probability of 0.18 of transforming into arboreal vegetation, because these are places suitable for reforestation; however, wasteland will decrease by the growth of the urban area (probability of 0.45).

It was detected that the arboreal vegetation and the wetlands will decrease 1,187 and 254 ha, respectively with the model of cellular automata. In contrast, grassland will apparently increase 1,114 ha, as it will lose 1,431 ha. The urban area will continue to accumulate area and will add 6,137 ha in 2030 (Table 5). The contributions between coverages from 2008 to 2030 (Table 6) predicted that the arboreal vegetation will lose 860 ha when replaced by grassland; moreover, 254 ha of wetlands will be transformed into grassland. Likewise, for its imminent expansion, the urban area will invade 316 ha of arboreal vegetation and 1,252 ha of wetlands.

pesar de la disminución de esta actividad, la transición de pastizal a vegetación arbórea por regeneración natural no se registró; en cambio, sólo se localizaron reducidas zonas reforestadas. La erosión de los suelos en la cuenca Grijalva-Usumacinta puede explicar la carencia de restauración natural, pues 47.64 % de su área registra pendientes de más de 8° (Sánchez-Hernández, Mendoza-Palacios, De la Cruz-Reyes, Mendoza-Martínez, & Ramos-Reyes, 2013).

En Tabasco, los humedales se han deteriorado debido al incremento del pastizal, la infraestructura urbana y la construcción de zonas industriales y carreteras (Estrada, Barba, & Ramos, 2013), a pesar de que tal cobertura es valorada por su carácter de regulador ambiental, amortiguamiento ante inundaciones, ecosistemas que albergan alta biodiversidad y hábitat para especies residentes y migratorias (Henny & Meutia, 2014; Hettiarachchi et al., 2014). Con relación a la contaminación de los humedales, la descarga de productos químicos y el aporte de sedimentos derivados de los desarrollos urbanos han propiciado condiciones hipertróficas desde el inicio de la década de 1990 (Goñi-Arévalo, Hernández-Pérez, Toledo-Gómez, & Pérez, 1991). Tales condiciones se han incrementado en Villahermosa (Hansen, Van Afferden, & Torres-Bejarano, 2007; Sánchez et al., 2012) y en otras áreas urbanas y costeras de la cuenca (Salcedo, Sánchez, De la Lanza, Kamplicher, & Florido, 2012).

#### Proyección de las probabilidades de cambios de uso de suelo (2030)

Para el año 2030, la sustitución de la vegetación arbórea por pastizales registró 0.52 de probabilidad, la cual fue seguida por 0.13 relacionado al crecimiento

**Table 4. Matrix of land use transition probabilities for 2030 in Villahermosa, Tabasco.**

**Cuadro 4. Matriz de probabilidades de transición de uso de suelo para el año 2030 en Villahermosa, Tabasco.**

Category/Categoría	Arboreal vegetation/ Vegetación arbórea	Wetlands/ Humedales	Grassland/ Pastizal	Wasteland/ Terrenos baldíos	Industrial land/ Industrial	Roads/ Carreteras	Urban land/ Urbano
Arboreal vegetation/ Vegetación arbórea	0.321	0.004	0.522	0.004	0.005	0.003	0.137
Wetlands/Humedales	0.000	0.882	0.116	0.000	0.000	0.000	0.000
Grassland/Pastizal	0.005	0.000	0.856	0.002	0.013	0.004	0.117
Wasteland/ Terrenos baldíos	0.184	0.000	0.000	0.356	0.000	0.004	0.454
Industrial land/ Industrial	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000
Roads/Carreteras	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.973	0.024
Urban land/Urbano	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.999



**Table 5. Losses and gains of area in the period 2008-2030 in Villahermosa, Tabasco, according to the model of cellular automata.****Cuadro 5. Pérdidas y ganancias de superficies en el periodo 2008-2030 en Villahermosa, Tabasco, de acuerdo con el modelo de autómatas celulares.**

Category/Categoría	Area 2008/ Superficie 2008		Area 2030/ Superficie 2030		Gains (2008-2030)/ Ganancia (2008-2030)		Losses (2008-2030)/ Pérdida (2008-2030)	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Arboreal vegetation/ Vegetación arbórea	1,893	9.2	722	3.5	16	0.02	-1,187	-1.78
Wetlands/Humedales	2,244	10.9	1,997	9.7	7	0.01	-254	-0.38
Grassland/Pastizal	11,239	54.4	10,922	52.9	1,114	1.67	-1431	-2.14
Wasteland/ Terrenos baldíos	203	1	84	0.4	0	0	-121	-0.018
Industrial land/ Industrial	184	0.9	325	1.6	137	0.2	0	0
Roads/Carreteras	435	2.1	476	2.3	42	0.06	0	0
Urban land/Urbano	4,458	21.6	6,137	29.7	1,679	2.51	0	0

**Table 6. Surface contributions between categories for the period 2008-2030 in Villahermosa, Tabasco.****Cuadro 6. Contribución de superficie entre categorías para el periodo 2008-2030 en Villahermosa, Tabasco.**

Category/Categoría	Arboreal vegetation (ha)/ Vegetación arbórea(ha)	Wetlands (ha)/ Humedales (ha)	Grassland (ha)/ Pastizal (ha)	Wasteland (ha)/ Terrenos baldíos (ha)
Arboreal vegetation/ Vegetación arbórea	0	7	860	316
Wetlands/Humedales	-7	0	254	0
Grassland/Pastizal	-860	-254	0	1,258
Wasteland/Terrenos baldíos	16	0	0	104
Industrial land/ Industrial	-4	0	-132	0
Roads/Carreteras	0	0	-41	0
Urban land/Urbano	-316	0	-1,252	0

The land-use change model, Markov chains and cellular automata accurately detected the distribution of natural coverages and artificial uses, probabilities and spatial projection of change for year 2030, providing useful information for environmental planning for the city of Villahermosa. Jiménez-Moreno, González-Guillén, Escalona-Maurice, Valdez-Lazalde and Aguirre-Salado (2011) mentioned that it is essential to use one or several models of land use change so that soil authorities and planners can understand the scope of the changes recorded and the risks involved. In addition, the changes recorded allow to identify the

urbano (Cuadro 4). En este sentido, los humedales desaparecerán para transformarse en pastizales con una probabilidad de 0.11; sin embargo, los pastizales a su vez serán sustituidos por la zona urbana con un índice de probabilidad de 0.11 (Cuadro 4). Los terrenos baldíos tienen una probabilidad de 0.18 de transformarse en vegetación arbórea, por ser lugares adecuados para la reforestación; sin embargo, disminuirán por el crecimiento de la zona urbana (probabilidad de 0.45).

Con el modelo de los autómatas celulares se detectó que la vegetación arbórea y los humedales

factors that are causing them and, therefore, are useful to follow the territorial order.

## Conclusions

Urban growth has been characterized by the development of urban and industrial surfaces in natural areas, especially wetlands. In the period analyzed, the urban area increased by almost 5,000 ha, causing a double risk; on the one hand, the loss of natural areas, and on the other hand, perhaps more important, is that it represents high probabilities of flooding for the population settled in this area. Meanwhile, foresight indicates that the loss of natural resources, and in particular of wetlands, will progressively continue to exceed more than 1,000 ha if there is no significant change in the paradigm or a program of land use management. This means that a significant part of the damage to infrastructure and economy due to recurrent floods in the urban area of the low basin is not necessarily a result of surplus precipitation, but instead the damage responds to the loss of wetlands and their use change to become residential areas. Therefore, to avoid scenarios of environmental deterioration in the next two decades, it is necessary to protect the territory with a comprehensive management plan and a legal decree to back it up.

## Acknowledgements

The authors thank the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología for the scholarship awarded for Ph.D. studies in Ecology and Tropical Systems Management (PNPC), and the Colegio de Postgraduados Campus Montecillos for training on geomatic models for the analysis of land use change.

*End of English version*

## References / Referencias

- Allub, L., & Michel, M. A. (1979). La formación socioeconómica de Tabasco y el petróleo. *Investigación Económica*, 38(148/149), 327-355. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/42777039>
- Angeoletto, F., Essy, C., Sanz, J. P. R., Da Silva, F. F., Albertin, R. M., & Santos, J. W. M. C. (2015). Ecología urbana: La ciencia interdisciplinaria del planeta ciudad. *Desenvolvimento em Questão*, 13(32), 6-20. Retrieved from <https://www.revistas.unijui.edu.br/index.php/desenvolvimentoemquestao/article/view/4001/4664>
- Bähr, J., & Borsdorf, A. (2005). La ciudad latinoamericana. La construcción de un modelo. Vigencia y perspectivas. *Urbes. Revista de ciudad, urbanismo y paisaje*, 2(2), 207-222. Retrieved from [http://www.guzlop-editoras.com/web\\_des/arquit01/pld0472.pdf](http://www.guzlop-editoras.com/web_des/arquit01/pld0472.pdf)
- disminuirán 1,187 y 254 ha, respectivamente. En cambio, el pastizal aparentemente incrementará 1,114 ha, pues perderá 1,431 ha. La zona urbana seguirá acumulando área y sumará 6,137 ha en 2030 (Cuadro 5). Las contribuciones entre coberturas 2008-2030 (Cuadro 6) predijeron que la vegetación arbórea perderá 860 ha al ser sustituida por el pastizal; asimismo, 254 ha de humedales se transformarán en pastizal. De la misma manera, para su expansión inminente, la zona urbana invadirá 316 ha de vegetación arbórea y 1,252 ha de humedales.
- El modelador del cambio de uso del suelo, las cadenas de Markov y los autómatas celulares detectaron con precisión la distribución de las coberturas naturales y usos artificiales, las probabilidades y la proyección espacial del cambio para el año 2030, generando información útil para la planificación ambiental de la ciudad de Villahermosa. Jiménez-Moreno, González-Guillén, Escalona-Maurice, Valdez-Lazalde, y Aguirre-Salado (2011) mencionaron que es imprescindible el empleo de uno o varios modelos de cambio de uso del suelo para que las autoridades y planificadores del suelo puedan comprender el alcance de los cambios registrados y los riesgos que ello implica. Además, los cambios registrados permiten identificar los factores que los están causando y, por lo mismo, son útiles para dar seguimiento al ordenamiento territorial.

## Conclusiones

El crecimiento urbano se ha caracterizado por el desarrollo de superficies urbanas e industriales sobre zonas naturales, especialmente de humedales. En el periodo analizado, la superficie urbana incrementó casi 5,000 ha, originando un doble riesgo; por un lado, la pérdida de áreas naturales, pero por otro, quizá más importante, es que representa probabilidades altas de inundación para la población asentada en esta área. Por su parte, la prospectiva indica que la pérdida de recursos naturales, y en particular de humedales, seguirá de forma progresiva hasta superar más de 1,000 ha si no hay un cambio significativo en el paradigma o un programa de ordenamiento del uso del suelo. Esto significa que parte importante de los daños a la infraestructura y economía por las inundaciones recurrentes en la zona urbana de la cuenca baja, no necesariamente son resultado de los excedentes de precipitación, por el contrario, responden a la pérdida de humedales y el cambio de uso para zonas habitacionales. Por lo tanto, para evitar escenarios de deterioro ambiental en las próximas dos décadas, es necesario proteger el territorio con un plan de manejo integral y un decreto legal que lo respalde.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para los estudios de

- Bazant, J. (2010). Expansión urbana incontrolada y paradigmas de la planeación urbana. *Espacio abierto*, 19(3). Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/122/12215112003.pdf>
- Biro, K., Pradhan, B., Buchroithner, M., & Makeschin, F. (2013). Land use/land cover change analysis and its impact on soil properties in the northern part of Gadarif region, Sudan. *Land Degradation & Development*, 24(1), 90-102. doi: 10.1002/ldr.1116
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2012). Retrieved from [http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/Documentos/LIBROS%20BLANCOS/CONAGUA-01%20Programa%20Integral%20de%20Tabasco%20\(PIHT\).pdf](http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/Documentos/LIBROS%20BLANCOS/CONAGUA-01%20Programa%20Integral%20de%20Tabasco%20(PIHT).pdf)
- 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 M. González-Espinosa, & M. C. Brunel-Manse (Eds.), *Montañas, pueblos y agua: dimensiones y realidades de la cuenca Grijalva* (pp. 1-25). México: Editorial Juan Pablos.
- Estrada, L. F., Barba, M. E., & Ramos, R. R. (2013). Cobertura de los humedales en la cuenca del Usumacinta, Balancán, Tabasco, México. *Universidad y Ciencia*, 29(2), 141-151. Retrieved from <http://132.248.10.25/era/index.php/rera/article/view/49>
- Eastman, J. R. (2012). IDRISI Selva GIS and image processing software version 17.0. Massachusetts, USA: Clark Labs.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2016). Using map topology editing tools in ArcView. Retrieved from [http://www.esri.com/news/arcuser/0703/files/av\\_topo\\_tut.pdf](http://www.esri.com/news/arcuser/0703/files/av_topo_tut.pdf)
- Goñi-Arévalo, J. A., Hernández-Pérez, O., Toledo-Gómez, J. L., & Pérez, M. M. Á. (1991). Eutrofización de la laguna de las Ilusiones y un modelo empírico del fósforo. *Universidad y Ciencia*, 8(15), 47-53. Retrieved from <http://132.248.10.25/era/index.php/rera/article/view/474/393>
- Gutiérrez, J., Condeço-Melhorado, A., & Martín, J. C. (2010). Using accessibility indicators and GIS to assess spatial spillovers of transport infrastructure investment. *Journal of Transport Geography*, 18(1), 141-152. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2008.12.003
- Hansen, A. M., Van Afferden, M., & Torres-Bejarano, F. (2007). Saneamiento del vaso Cencafi, Villahermosa, Tabasco. I. Contaminación y reúso de sedimentos. *Ingeniería Hidráulica en México*, XXII(4), 87-102. Retrieved from <http://repositorio.imta.mx:8080/cenca-repositorio/bitstream/123456789/847/1/215854.pdf>
- Henny, C., & Meutia, A. A. (2014). Urban lakes in megacity Jakarta: Risk and management plan for future sustainability. *Procedia Environmental Sciences*, 20, 737-746. doi: 10.1016/j.proenv.2014.03.088
- Hettiarachchi, M., Morrison, T. H., Wickramasinghe, D., Mapa, R., De Alwis, A., & McAlpine, C. A. (2014). The eco-social transformation of urban wetlands: A case study of Colombo, Sri Lanka. *Landscape and Urban Planning*, 132, 55-68. doi: 10.1016/j.landurbplan.2014.08.006
- Jiménez-Moreno, M. J., González-Guillén, M. D. J., Escalona-Maurice, M., Valdez-Lazalde, J. R., & Aguirre-Salado, Doctorado en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales (PNPC), y al Colegio de Postgraduados Campus Montecillos por la capacitación sobre los modelos geomáticos para el análisis del cambio de uso de suelo.

### Fin de la versión en español

C. A. (2011). Comparación de métodos espaciales para detectar cambios en el uso del suelo urbano. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(3), 389-406. doi: 10.5154/r.rchscfa.2010.04.020

Kolb, M., & Galicia, L. (2012). Challenging the linear forestation narrative in the Neo-tropic: Regional patterns and processes of deforestation and regeneration in southern Mexico. *The Geographical Journal*, 178(2), 147-161. doi:10.1111/j.1475-4959.2011.00431.x

Kolb, M., Mas, J. F., & 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. doi:10.1080/13658816.2013.770517

Linard, C., Tatem, A. J., & Gilbert, M. (2013). Modelling spatial patterns of urban growth in Africa. *Applied Geography*, 44, 23-32. doi: 10.1016/j.apgeog.2013.07.009

Mitsch, W. J., Goseelink, J. G., & Anderson, C. J. (2009). *Wetland ecosystems*. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc.

Navarro, J. M., & Toledo, H. (2004). Transformación de la cuenca del río Grijalva. *Revista Noticias AMIP*, 4(16), 11-22. Retrieved from <http://www.amip.org.mx/html/RevAMIP/A4NUM16/AMIP41611.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2015). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015*. Roma, Italia: Autor. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i4808s.pdf>

Palacio-Prieto, J. L., Sánchez-Salazar, M. T., Casado, J. M., Propin, F. E., Delgado, C. J., Velázquez, M. A., ... Camacho, R. C. G. (2004). Indicadores para la caracterización y el ordenamiento territorial. México: SEMARNAT. Retrieved from <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/download/434.pdf>

PCI Geomatics Enterprises. (2003). *Geomatica training guide*. Ontario, Canadá: Autor. Retrieved from <http://www.pcigeomatics.com/pdf/TrainingGuide-Geomatica-1.pdf>

Perevochtchikova, M., & Lezama, T. J. L. (2010). Causas de un desastre: Inundaciones del 2007 en Tabasco, México. *Journal of Latin American Geography*, 9(2), 73-98. doi:10.1353/lag.2010.0010

Pinkus-Rendón, M. J., & Contreras-Sánchez, A. (2012). Impacto socioambiental de la industria petrolera en Tabasco: el caso de la Chontalpa. *LiminaR*, 10(2), 122-144. Retrieved from <http://liminar.cesmeca.mx/index.php/r1/article/view/99/86>

- Reynoso-Santos, R., Valdez-Lazalde, J. R., Escalona-Maurice, M. J., De los Santos-Posadas, H. M., & Pérez-Hernández, M. J. (2016). Cadenas de Markov y autómatas celulares para la modelación de cambio de uso de suelo. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 37(1), 72-81. Retrieved from <http://riha.cujae.edu.cu/index.php/riha/article/view/319/272>
- Salazar, L. F. (2002). Ubicación cartográfica de Villahermosa en 1579. *Antropología. Boletín Oficial del INAH*, 66, 32-40. Retrieved from <https://revistas.inah.gob.mx/index.php/antropologia/article/view/4989/5015>
- Salcedo, M. A., Sánchez, A. J., De la Lanza, G., Kamplicher, C., & Florido, R. (2012). Condición ecológica del humedal tropical Pantanos de Centla. En A. J. Sánchez, X. Chiappa-Carrara, & R. Brito (Eds.), *Recursos acuáticos costeros del sureste* (vol. II, pp. 112-136). Mérida, Yucatán, México: CONCYTEY.
- Sánchez, A. J., Salcedo, M. A., Florido, R., Mendoza, J. D., Ruiz-Carrera, V., & Álvarez-Pliego, N. (2015). Ciclos de inundación y conservación de servicios ambientales en la cuenca baja de los ríos Grijalva-Usumacinta. *ContactoS*, 97, 5-14. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/291827814\\_Ciclos\\_de\\_inundacion\\_y\\_conservacion\\_de\\_servicios\\_ambientales\\_en\\_la\\_cuenca\\_baja\\_de\\_los\\_rios\\_Grijalva-Usumacinta](https://www.researchgate.net/publication/291827814_Ciclos_de_inundacion_y_conservacion_de_servicios_ambientales_en_la_cuenca_baja_de_los_rios_Grijalva-Usumacinta)
- Sánchez, A. J., Salcedo, M. Á., Macossay-Cortez, A. A., Feria-Díaz, Y., Vázquez, L., Ovando, N., & Rosado, L. (2012). Calidad ambiental de la laguna urbana. La Pólvora en la cuenca del río Grijalva. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(3), 143-152. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v3n3/v3n3a10.pdf>
- Sánchez-Colón, S., Flores-Martínez, A., Cruz-Leyva, I. A., & Velázquez, A. (2009). Estado y transformación de los ecosistemas terrestres por causas humanas. En Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (Ed.), *Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio*, (pp. 75-129). México: Autor. Retrieved from [http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/pdf/CapNatMex/Vol%20II/II02\\_Estado%20y%20transformacion%20de%20los%20ecosistemas%20terrestres.pdf](http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/pdf/CapNatMex/Vol%20II/II02_Estado%20y%20transformacion%20de%20los%20ecosistemas%20terrestres.pdf)
- Sánchez-Hernández, R., Mendoza-Palacios, J. D. D., De la Cruz-Reyes, J. C., Mendoza-Martínez, J. E., & Ramos-Reyes, R. (2013). Mapa de erosión potencial en la cuenca hidrológica Grijalva-Usumacinta México mediante el uso de SIG. *Universidad y ciencia*, 29(2), 153-161. Retrieved from <http://132.248.10.25/era/index.php/rera/article/view/50>
- Sánchez-Munguía, A. (2005). *Uso del suelo agropecuario y deforestación en Tabasco 1950-2000*. Villahermosa, Tabasco, México: Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Torres-Vera, M. A., Prol-Ledesma, R. M., & García-López, D. (2009). Three decades of land use variations in Mexico City. *International Journal of Remote Sensing*, 30(1), 117-138. doi:10.1080/01431160802261163
- Velázquez, A., Mas, J. F., Gallegos, J. R. D., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, P. C., Castro, R., & Palacio, J. L. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta ecológica*, 62, 21-37. Retrieved from <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/download/357.pdf>
- Zavala, C. J., & Castillo, A. O. (2007). Cambio de uso de la tierra en el estado de Tabasco. En D. J. Palma-López, & A. Triano (Eds.), *Plan de uso sustentable de los suelos del estado de Tabasco* (vol. II, pp. 38-56). Villahermosa, Tabasco, México: Colegio de Postgraduados.
- Zavala, C. J., Castillo, A. O., Ortiz, I. C., Palma, L. D. J., Salgado, G. S., Rincón, R. J. A., ... Ramos, R. R. (2009). *Capacidad de uso del suelo urbano en Tabasco: Con base en suelo, uso actual y vegetación*. Cárdenas, Tabasco, México: Colegio de Postgraduados.
- Zepeda-Gómez, C., Nemiga, X. A., Lot-Helgueras, A., & Madrigal-Urbe, D. (2012). Análisis del cambio del uso del suelo en las ciénegas de Lerma (1973-2008) y su impacto en la vegetación acuática. *Investigaciones geográficas*, 78, 48-61. Retrieved from <http://www.revistas.unam.mx/index.php/rig/article/view/32469/29941>