

Análisis del cambio del uso del suelo en las ciénegas de Lerma (1973-2008) y su impacto en la vegetación acuática

Recibido: 20 de septiembre de 2011. Aceptado en versión final: 30 de enero de 2012.

Carmen Zepeda Gómez*

Xanat Antonio Nemiga***

Antonio Lot Helgueras**

Delfino Madrigal Uribe***

Resumen. Las ciénegas de Lerma son áreas de alta diversidad impactada y deteriorada por el desarrollo industrial y urbano del Valle de Toluca. Los cambios, intercambios y transiciones sistemáticas de uso de suelo ocurridos en ellas entre 1973 y 2008, se evaluaron y relacionaron con la diversidad de la vegetación acuática que aún conservan. Se visualizó la repartición de la flora dominante y el tipo de plantas que prevalece en cada humedal mediante análisis de correspondencia. Se revela que los procesos de transformación varían espacial y temporalmente en cada ciénega, pero la tendencia más generalizada es la pérdida de zonas de agua abierta y tulares, las cuales tienden a transformarse en zonas de baja inundación

que favorece una flora hidrófita de menor talla y adaptada a los disturbios, que posteriormente es sustituida por campos de cultivo y eventualmente por espacios urbanos. El ritmo de destrucción de los humedales fue más intenso de 1973 a 1989, pero aún se mantenía en 2008. La expansión de áreas agrícolas y urbanas ha desplazado a las áreas inundables, causando efectos negativos sobre la diversidad y estructura de la vegetación acuática de las ciénegas.

Palabras clave: Chignahuapan, Chimaliapan, Chiconahuapan, Lerma, uso de suelo, vegetación.

Land use change in Lerma marshes (1973-2008) and its impact on aquatic vegetation

Abstract. The Lerma marshes maintain a high diversity impacted and damaged by industrial and urban development of the Valley of Toluca. The changes, exchanges and the systematic transitions of land use occurred in the marshes between 1973 and 2008 were evaluated and related to the current diversity of aquatic vegetation. We use correspondence analysis to visualize the distribution of the dominant flora and the type of plants prevalent in each wetland. Transformation processes vary spatially and temporally in each marsh, but the general trend is the loss of open water areas and cattail marshes, which tend to transform into lands of

low flood with hydrophytes of smaller size and adapted to disturbance, later these fields are replaced by farmland and urban spaces. The rate of destruction of wetlands was most intense from 1973 to 1989, but remained in 2008. The expansion of agricultural and urban areas has displaced flood areas, causing negative effects on diversity and structure of aquatic vegetation in the marshes.

Key words: Chignahuapan, Chimaliapan, Chiconahuapan, Lerma, land use, vegetation.

* Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de México, Instituto Literario 100, Col. Centro, 50000, Toluca, Estado de México. E-mail: zepedac@uaemex.mx and zepedacar@yahoo.com.mx

** Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Jardín Botánico, Ciudad Universitaria, 04510, Coyoacán, México, D. F. E-mail: loth@ibunam2.ibiologia.unam.mx

*** Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México, Instituto Literario 100, Col. Centro, 50000, Toluca, Estado de México. E-mail: xanynemiga@rocktmail.com; dmadrigalu@uaemex.mx

INTRODUCCIÓN

En todo el mundo, las actividades humanas están modificando la configuración del paisaje natural y alterando el funcionamiento de sus ecosistemas (DeFries *et al.*, 2004). La tendencia es el reemplazo de paisajes naturales por tierras agrícolas y zonas urbanas, lo cual repercute negativamente en la diversidad, coherencia, identidad y en los servicios ambientales que los sistemas naturales ofrecen (Antrop, 2005). La modificación del paisaje por actividades humanas ha conducido a que en las últimas décadas, más del 50% de la superficie mundial de humedales se perdiera (Mitsch y Gosselink, 2007; Torbick *et al.*, 2006). En México, el desarrollo económico ha causado cambios drásticos en la mayoría de los ecosistemas (Velázquez *et al.*, 2002; Reyes *et al.*, 2006; Castelán *et al.*, 2007) y particularmente los sistemas acuáticos no han sido la excepción, el 35% de los humedales y ecosistemas de aguas profundas del país han sufrido deterioro, han sido sensiblemente modificados o se han perdido (Sánchez *et al.*, 2007).

Las ciénegas del río Lerma se conservan como los últimos remanentes de los extensos humedales del Altiplano Central Mexicano, ahora sometidos a procesos de contaminación, desecación y fragmentación, que han impactando su biodiversidad (Ramos, 2000). La degradación de estos sistemas es un problema complejo que requiere un enfoque multidisciplinario y la aplicación de tecnología. Los sensores remotos y los sistemas de información geográfica (SIG) son idóneos para inventarios, evaluaciones y el monitoreo de cuencas hidrográficas y humedales, ya que registran en tiempo y espacio los cambios de uso del suelo regional (Torbick *et al.*, 2006; Shalaby y Tateishi, 2007; Schulz *et al.*, 2010). El objetivo de este trabajo fue determinar el cambio de uso de suelo ocurrido entre 1973 y 2008 en las ciénegas de Lerma y relacionarlo con la diversidad de la vegetación acuática que conservan. Esto permitirá conocer cuáles han sido las principales tendencias de cambio de uso del suelo y sus efectos sobre las comunidades de vegetación acuática, información que puede apoyar la planificación y el diseño de estrategias de gestión, conservación y restauración de la zona.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área en estudio

Las ciénegas de Lerma, conocidas como Chignahuapan, Chimaliapan y Chiconahuapan, constituyen áreas poco profundas y con régimen lacustre cuya extensión aproximada es de 596, 2 081 y 346 ha, respectivamente. Se ubican en el curso alto del río Lerma en el Estado de México, entre las coordenadas extremas 19° 08' 76" y 19° 21' 25" de latitud Norte y los 99° 29' 21" y 99° 31' 08" de longitud Este, están asentadas entre los 2 560 y los 2 580 m snm (Figura 1). Son los relictos de una extensa zona inundada que en la época prehispánica cubría 27 025 ha aproximadamente. El manejo inadecuado y la presión de las actividades humanas condujeron a que en 1940 sólo quedaran tres áreas inundadas que en conjunto cubrían 10 746 ha. Para 1988 su extensión se estimó en 3 200 ha (Martínez, 1993). A pesar de los grandes problemas ambientales que enfrentan estas ciénegas (Anton y Díaz, 2000), aún funcionan como un vaso regulador de inundaciones, además, poseen una gran diversidad de flora y fauna que incluye especies endémicas y nativas en riego (Pérez y Valdez, 2006). Debido a esto han sido decretadas Áreas Naturales Protegidas (ANP) para la protección de flora y fauna (SEMARNAT, 2002), Área de Importancia para la Conservación de Aves y hábitat prioritario para aves acuáticas residentes y migratorias (Ramsar List, 2006).

Clasificación y evaluación del cambio en el uso de suelo

Para evaluar las tendencias recientes del cambio del uso de suelo, se obtuvieron las imágenes satelitales descritas en el Cuadro 1 y se procesaron con el software ENVI 4.2 (Research Systems, 2005).

La escena 28/47 de 1973 fue calibrada con los metadatos para corregirle efectos atmosféricos y de iluminación. Las tres escenas fueron coregistradas con la proyección UTM zona 14 *datum* wgs84. Se entrenaron regiones (áreas de interés) según su categoría de uso de suelo basadas en conocimiento experto, producto de visitas previas al área. Las escenas fueron clasificadas por el método supervisado con el algoritmo *Mahalanobis distance*. Así se generaron imágenes distinguiendo cinco categorías

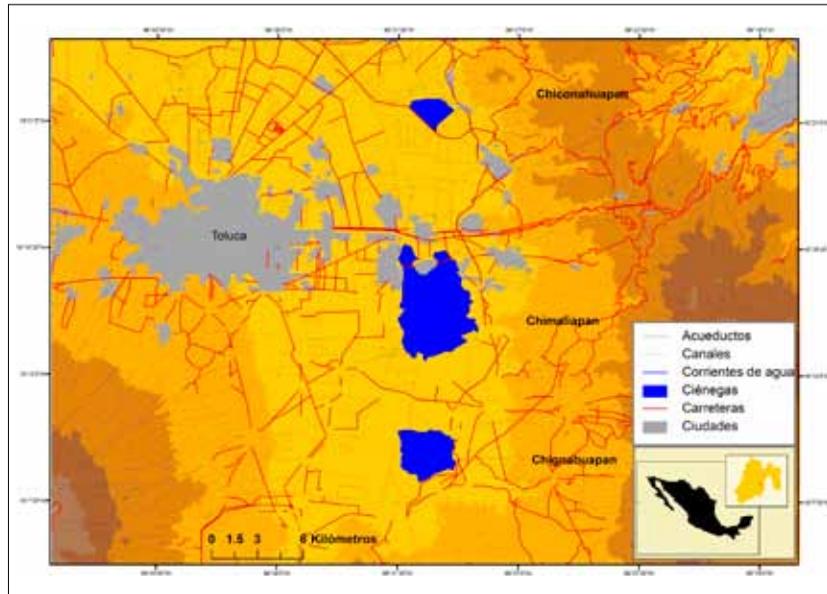


Figura 1. Ubicación de las ciénegas de Lerma.

de uso de suelo: *a*) urbano: áreas urbanas e industriales, *b*) cuerpos de agua: ríos, lagunas y depósitos de agua abierta, *c*) agrícola: áreas de agricultura de temporal, *d*) tulares: vegetación acuática constituida por especies de los géneros *Typha* y *Schoenoplectus*, *e*) vegetación acuática: vegetación herbácea de porte bajo y típica de ambientes con niveles de agua inferiores a 1 m y de un estado sucesional inferior al de la categoría de tulares.

Una vez clasificadas, las imágenes con las cinco categorías de uso de suelo fueron convertidas al formato ráster, en el que se calculó la superficie ocupada por cada clase y las matrices de cambio entre categorías de uso de suelo. Se comparó la fecha inicial y final del periodo usando ArcView 3.3 (ESRI, 1992). Los cambios se evaluaron en tres

diferentes periodos: *a*) 1973-1989, *b*) 1989-2008 y *c*) 1973-2008. Se calcularon las tasas de ganancia, pérdida y cambio neto de acuerdo con Pontius *et al.* (2004), la probabilidad de permanencia (PP) de las clases según Mendoza *et al.* (2002) y Castelán *et al.* (2007), y la tasa anual de cambio (TAC) de cada clase según Puyravaud (2003).

Análisis de la vegetación actual

Las tendencias de cambio se asociaron con la composición actual de la vegetación en las tres ciénegas reportadas en Zepeda *et al.*, (2012). Los valores de importancia de las especies de la flora de los humedales de Lerma se ordenaron mediante un Análisis de Correspondencia (AC) para visualizar la repartición de las especies en cada ciénega. La fre-

Cuadro 1. Características de las escenas utilizadas

Escena	Fecha	Sensor	Resolución	Proveedor
28/47	23/11/1973	Landsat MSS	Espacial: 57 m. Espectral: 3 bandas visibles, 1 infrarroja.	EARTSAT- Global Land Cover Facility
26/47	07/03/1989	Landsat TM	Espacial: 30 m Espectral: 4 bandas visibles, 2 infrarrojas y 1 pancromática.	EARTSAT- Global Land Cover Facility
E14a38 E14a48	--/04/ 2008	SPOT	Espacial: 10 m Espectral: 3 bandas visibles, 1 infrarroja y 1 pancromática.	ERMEX México- SAGARPA

cuencia de las formas de vida, hábito y tipo planta se ordenaron mediante otro AC para establecer el tipo de plantas que prevalece en cada ciénega. El coeficiente de correlación de Pearson se usó para establecer las relaciones entre el área ocupada por las categorías de uso de suelo en 2008 y los valores de diversidad de Shannon y riqueza de especies de la vegetación acuática reportados por Zepeda *et al.* (2012). Los análisis estadísticos se hicieron en el programa Statistica 7 (StatSoft, 2004).

RESULTADOS

Descripción del cambio de uso de suelo por ciénega

a) Ciénega de Chignahuapan

La extensión de la ciénega de Chignahuapan se ha reducido progresivamente desde 1973 donde el

87.7% de su territorio (2 904.6 ha) estaba cubierto por vegetación acuática de porte bajo, tulares y áreas de agua abierta, solo el 13.9% (461 ha) tenía uso agrícola y urbano (Figuras 2 y 3). En 1989 y 2008 los campos de cultivo cubrían más del 50% del área de la ciénega, lo que significa que en 35 años crecieron 375% (TAC de 4.10%; Cuadro 2). La matriz de cambio indica que en 2008 los campos de cultivo invadieron espacios que en 1973 estaban ocupados principalmente por vegetación acuática de porte bajo (1 460 ha) y tulares (334 ha). Estas últimas comunidades vegetales son las que han experimentado las mayores pérdidas (Cuadros 3 y 4), las más intensas ocurrieron de 1973 a 1989 (Cuadro 2), con una TAC de -3.1 y -6.5%, respectivamente.

Las zonas urbanas crecieron 554% (134 ha) de 1973 a 2008 (Cuadro 2) ocupando principalmente espacios anteriormente cubiertos de vegetación acuática de talla baja (101 ha; Cuadro 3). Entre

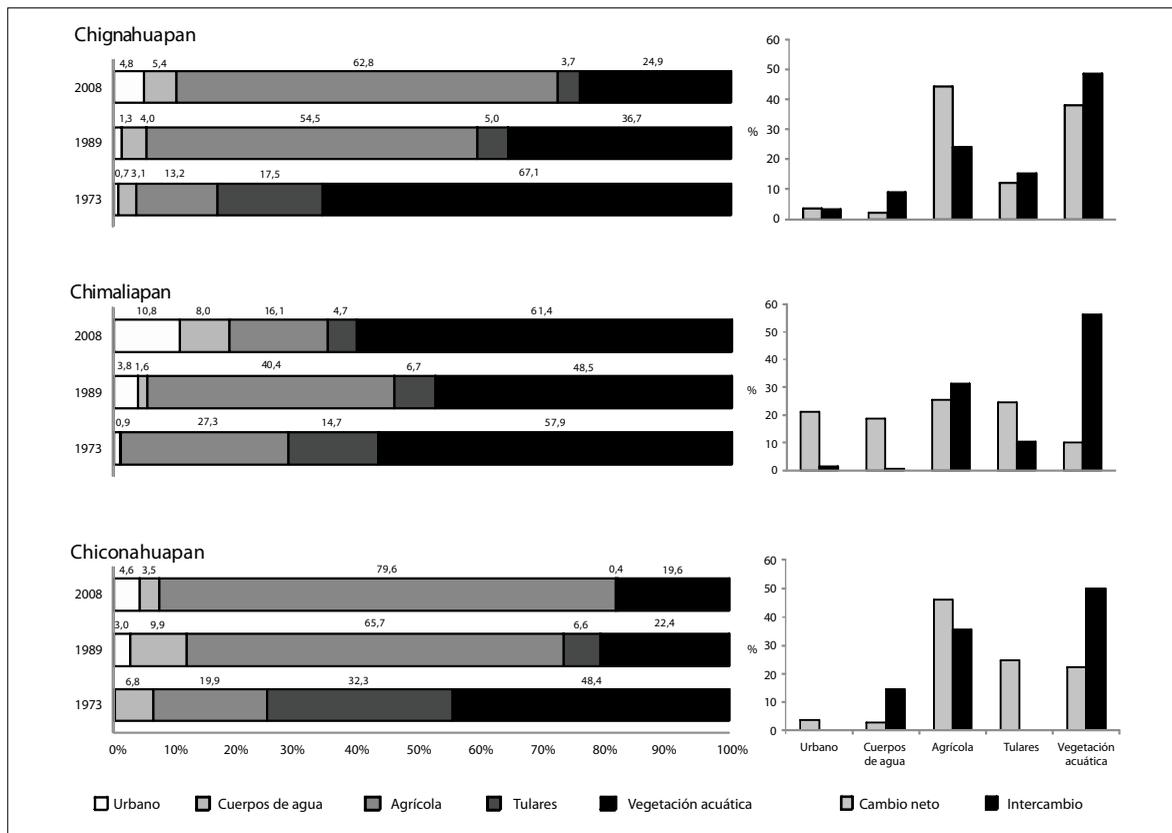


Figura 2. Comparación del porcentaje de cobertura del suelo, cambio neto e intercambio de las ciénegas de Lerma en 1973, 1989 y 2008.

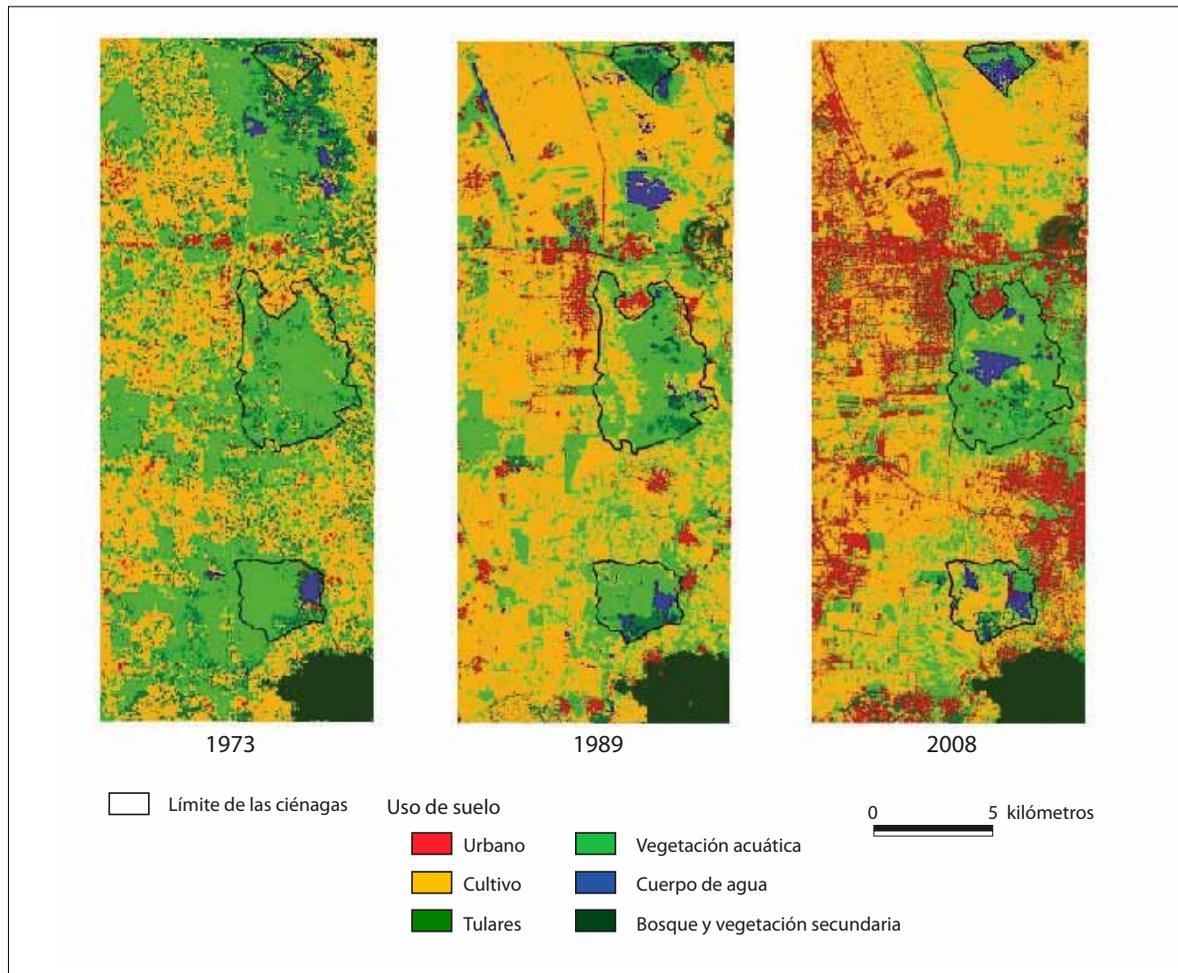


Figura 3. Uso de suelo en las ciénegas de Lerma en 1973, 1989 y 2008. Los polígonos representan las tres Áreas Naturales Protegidas.

1973 y 2008 las zonas de agua abierta aumentaron su extensión de 101 ha a 178 ha (Cuadro 3).

El porcentaje de cambio neto entre 1973 y 2008 fue de 44% para la categoría de uso agrícola, seguida por la vegetación acuática de porte bajo (37.9; Figura 2), tulares (12.1%), urbano (3.5%) y cuerpos de agua (2.1%). La vegetación acuática mostró los valores más altos de intercambio, superando a los de cambio neto, lo que sugiere que es muy dinámica. Los asentamientos humanos, los tulares y el resto de la vegetación acuática presentaron una baja probabilidad de permanecer como tales (<67%; Cuadro 3). Los procesos de recuperación son muy bajos y las pérdidas fueron cinco veces más grandes que las ganancias (Cuadro 3).

b) *Ciénega de Chimaliapan*

En 1973 Chimaliapan tenía un área inundada de 3 326 ha, de la cual el 72.8% (2 412 ha) era vegetación acuática de porte bajo, tulares y cuerpos de agua, y solo el 28.3% (936.7 ha) eran cultivos y de uso urbano (Figura 2). En 1989 la vegetación acuática de porte bajo se redujo a 310 ha (54% de su extensión en 1973) a una TAC de -0.04%; sin embargo, recuperó 426 ha (26 %) entre 1989 y 2008, de tal forma que para 2008 había 2033 ha de vegetación acuática (Cuadro 2). La matriz de cambio de 1973 a 2008 (Cuadro 3) muestra que las principales pérdidas de vegetación acuática implicaron una transición hacia campos de cultivo y zonas de agua abierta. Por el contrario, la recuperación

Cuadro 2. Evolución de la cobertura, uso de suelo en superficie y porcentaje entre 1973, 1989 y 2008 para las tres ciénegas de Lerma

	1973		1989		2008		Cambio de superficie (ha) de 1973 a 2008
Chignahuapan							
Categoría	Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha (%)
Urbano	24.2	0.7	41.8	1.3	158.3	4.8	134.1 (554)
Cuerpos de agua	101.1	3.1	134.1	4.0	178.1	5.4	77.0 (76)
Agrícola	437.6	13.2	1807.4	54.5	2080.0	62.8	1642.5 (375)
Tulares	578.3	17.5	167.1	5.0	123.1	3.7	-455.1 (78)
Vegetación acuática	2225.1	67.1	1215.9	36.7	826.7	24.9	-1398.4 (62)
Chimaliapan							
Urbano	30.8	0.9	127.5	3.8	358.4	10.8	327.6 (1064)
Cuerpos de agua	6.6	0.2	52.8	1.6	266.1	8.0	259.5 (3933)
Agrícola	905.9	27.3	1339.0	40.4	534.3	16.1	-371.6 (41)
Tulares	488.1	14.7	222.1	6.7	156.1	4.7	-332.0 (68)
Vegetación acuática	1917.3	57.9	1607.3	48.5	2033.9	61.4	116.5 (6)
Chiconahuapan							
Urbano	6.6	0.2	98.9	3.0	151.7	4.6	145.1 (2199)
Cuerpos de agua	224.3	6.8	327.6	9.9	114.3	3.5	-109.9 (49)
Agrícola	659.6	19.9	2176.8	65.7	2636.3	79.6	1976.7 (299)
Tulares	1070.8	32.3	217.7	6.6	13.2	0.4	-1057.6 (98)
Vegetación acuática	1602.9	48.4	743.2	22.4	648.6	19.6	-954.3 (59)

que la vegetación acuática presentó entre 1989 a 2008 provino principalmente de la inundación de 798 ha de campos de cultivo y 129 ha de tulares. La pérdida de vegetación acuática fue 1.2 veces inferior que la ganancia (Cuadro 3).

En 35 años los tulares se redujeron 65% (307 ha), en su mayoría transitaron hacia zonas inundadas con vegetación acuática de menor porte. El área que ocupaban estas plantas en 1973 (488 ha) disminuyó a 222 ha en 1989 y 156 ha en 2008 (Cuadro 2, Figura 2). La categoría agrícola presentó incrementos y disminuciones en su superficie: en 2008 sólo cubría el 16.1% (534 ha) de la zona en estudio (Figura 2). De 1973 a 1989 creció 47.8% (433 ha), desplazando a tulares y vegetación acuática de porte bajo (250 y 664 ha, respectivamente). De 1989 a 2008 perdió 804 ha transferidas a terrenos que se inundaron y desarrollaron vegetación acuática (Cuadro 3).

Las zonas urbanas y de aguas abiertas se expandieron de 1973 a 2008. Las urbanas crecieron 327 ha (1064% del área que ocupaban en 1973 con una TAC=0.6%), el 21.8% provino de campos agrícolas. Los espacios con agua abierta crecieron 3933% entre 1973 y 2008; en 2008 cubrían 259 ha (Cuadro 2) que procedían principalmente de áreas de vegetación acuática (Cuadro 3). En todo el periodo de estudio, las cinco categorías de uso presentaron una tasa de cambio neto superior al 10% (Figura 2). Destaca el uso agrícola por presentar el mayor cambio neto de 1973 a 2008 (25.6%). La vegetación acuática de porte bajo sobresale como el componente más dinámico al presentar los valores más altos de intercambio (56.4%).

Hubo una tendencia de aumento de las zonas urbanas y de vegetación acuática que, junto con los cuerpos de agua, presentaron una probabilidad media (entre 33% y 67%) de mantenerse como tales

Cuadro 3. Matriz de cambio y probabilidad de permanencia (en paréntesis, %) de uso de suelo entre 1973 y 2008

Uso del suelo en 1973 (ha)	Uso del suelo en 2008 (ha)						
	Urbano	Cuerpos de agua	Agrícola	Tulares	Vegetación acuática	TOTAL 1973	Pérdidas
Chignahuapan							
Urbano	2.2 (9.1)	6.6 (27.3)	6.6 (27.3)	0.0 (0.0)	8.8 (36.4)	24.2	22.0
Cuerpos de agua	8.8 (8.7)	41.8 (41.3)	8.8 (8.7)	0.0 (0.0)	41.8 (41.3)	101.1	59.4
Agrícola	22.0 (5.0)	8.8 (2.0)	277.0 (63.3)	17.6 (4.0)	112.1 (25.6)	437.6	160.5
Tulares	19.8 (3.4)	37.4 (6.5)	334.2 (57.8)	28.6 (4.9)	158.3 (27.4)	578.3	549.7
Vegetación acuática	101.1 (4.5)	83.6 (3.8)	1460.0 (65.5)	83.6 (3.8)	496.9 (22.3)	2225.1	1728.2
Total 2008	153.9	178.1	2086.6	129.7	817.9		
Ganancias	151.7	136.3	1809.6	101.1	321.0		
Chimaliapan							
Urbano	13.2 (42.9)	0.0 (0.0)	6.6 (21.4)	0.0 (0.0)	11.0 (35.7)	30.8	17.6
Cuerpos de agua	0.0 (0.0)	2.2 (33.3)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	4.4 (55.8)	6.6	4.4
Agrícola	197.9 (21.8)	26.4 (2.9)	167.1 (18.1)	8.8 (1.0)	505.7 (55.8)	905.9	738.8
Tulares	39.6 (8.1)	33.0 (6.8)	85.8 (17.6)	22.0 (4.5)	307.8 (63.1)	488.1	466.1
Vegetación acuática	72.6 (3.2)	206.7 (10.8)	292.4 (15.3)	118.7 (6.2)	1226.9 (64.0)	1917.3	690.4
Total 2008	323.2	268.2	551.9	149.5	2055.8		
Ganancias	310.0	266.1	384.8	127.5	828.9		
Chiconahuapan							
Urbano	6.6 (100)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	6.6	0.0
Cuerpos de agua	6.6 (2.9)	4.4 (2.0)	167.1 (74.5)	0.0 (0.0)	46.2 (20.6)	224.3	219.9
Agrícola	72.6 (11.0)	46.2 (7.0)	415.6 (63.0)	0.0 (0.0)	125.3 (19.0)	659.6	244.1
Tulares	33.0 (3.1)	46.2 (4.3)	811.3 (75.8)	9.0 (0.8)	171.5 (16.0)	1071.0	1062.0
Vegetación acuática	52.8 (3.3)	6.6 (0.4)	1246.7 (77.8)	0.0 (0.0)	296.8 (18.5)	1602.9	1306.1
Total 2008	171.5	103.3	2640.7	9.0	639.8		
Ganancias	164.9	98.9	2225.1	0.0	343.0		

(Cuadro 3). Por el contrario, los tulares presentaron la menor probabilidad de permanecer (4.5%), pues mostraron una tendencia de cambio hacia zonas de vegetación de menor talla (Cuadro 3). La transición entre zonas agrícolas y de vegetación acuática es bidireccional y se mantiene (Figura 4), como también lo hace la de cuerpos de agua hacia vegetación acuática (Cuadro 3).

c) *Ciénega de Chiconahuapan*

En 1973 esta ciénega tenía 2 897 ha de vegetación acuática de porte bajo, tulares y espacios de agua abierta (82.3%), menos del 20% (666 ha) estaba destinado a la agricultura y a zonas urbanas (Fi-

gura 2). Entre 1973 y 2008 los campos de cultivo y las áreas urbanas crecieron 299% (1976 ha) y 2 199% (145 ha), respectivamente (Cuadro 2), de 1973 a 1989 su expansión se presentó a una TAC =0.06% y TAC=0.14%, pero de 1989 a 2008 esta tasa disminuyó notablemente (TAC=0.01 y 0.02%, respectivamente). La transición entre categorías de 1973 a 2008 (Cuadro 3) indica que los campos de cultivo ocuparon espacios de vegetación acuática de baja talla (1 246.7 ha) y tulares (811.3 ha), y las zonas urbanas crecieron sobre áreas de cultivo (72.6 ha) y de vegetación acuática (52.8 ha). Las zonas de agua abierta presentaron un incremento importante de 1973 a 1989 (46%;

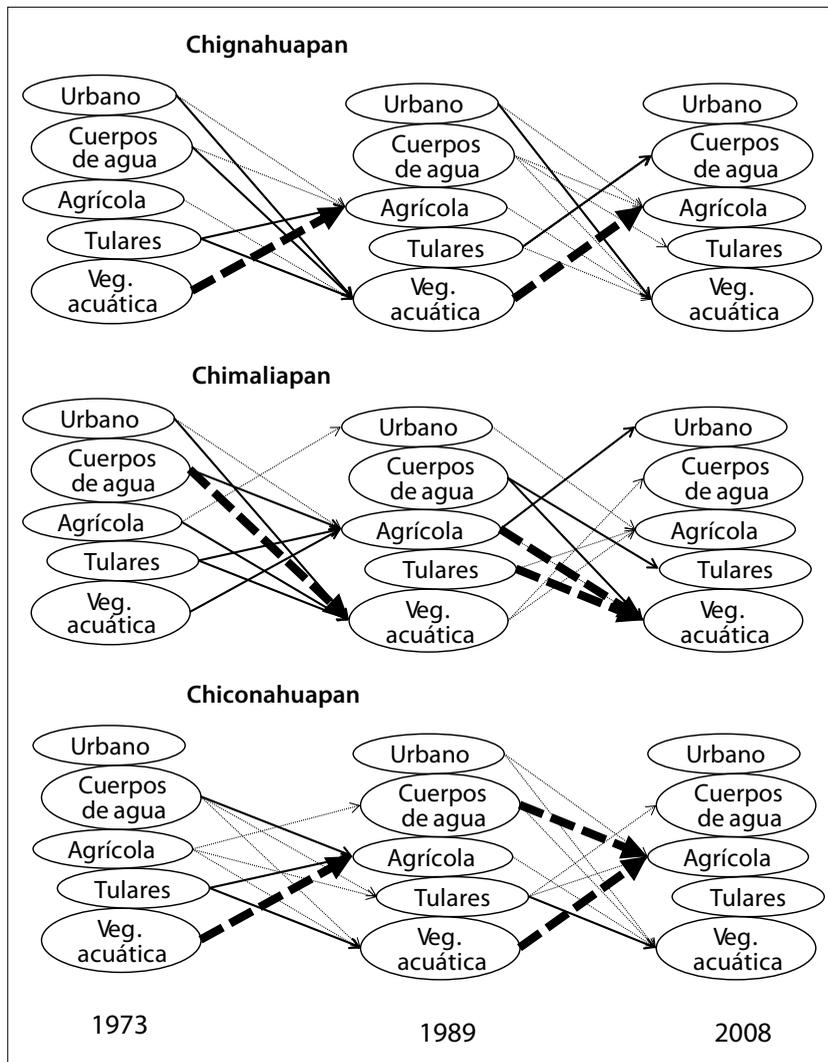


Figura 4. Trayectoria de los principales cambios en las ciénegas de Lerma. Línea delgada: 10-30 % de cambio; línea sólida: 31- 50% de cambio y línea segmentada >50% de cambio.

103.3 ha) por la inundación de zonas de cultivo y la pérdida de tulares (Cuadro 3), pero entre 1989 y 2008 se redujeron 65% (213.3 ha) y fueron desplazadas en su mayoría (167 ha) por campos de cultivo (Cuadro 3).

Los procesos de deterioro más evidentes se presentaron en los tulares, que perdieron 204 ha (94%) en todo el periodo de evaluación (TAC= -0.12%), las mayores mermas se presentaron de 1973 a 1989 cuando perdieron 79% (Cuadro 2, Figura 2). Estos espacios fueron ocupados por campos de cultivo (75.5%) y vegetación acuática de porte bajo (16%; Cuadro 3). El mayor cambio neto (46%) ocurrió en los campos de cultivo, seguido de los tulares (24.7%), la vegetación acuática (22.4%) y las zonas urbanas y de aguas abiertas (<4%). Los valores de intercambio indican que el componente más dinámico fue la vegetación acuática (Figura 2). Las tendencias más generalizadas (Figura 4) son el deterioro de tulares, vegetación acuática de porte bajo y áreas de agua abierta, que exhibieron los valores más bajos de probabilidad de permanecer como tales (0.8, 18.5 y 2.0%, respectivamente) y el incremento de las áreas de cultivo sobre zonas de aguas abiertas, vegetación acuática de porte bajo y tulares (Cuadro 3). Los procesos de recuperación son muy bajos o incluso nulos (Cuadro 3).

El cambio de uso de suelo está generando una disminución progresiva del área inundable y de vegetación natural de las ciénegas de Lerma. Desde los diferentes intentos por desecarlas y al menos hasta el 2008, los municipios con mayor densidad poblacional dentro del curso alto han sido las regiones con mayor desarrollo industrial (Toluca y municipios colindantes) y en los que el deterioro de los sistemas naturales ha sido más fuerte (SEMARNAT, 2010). El problema fundamental de este deterioro se centra en el manejo intensivo y extensivo que históricamente se ha hecho del agua. El cambio de

los patrones naturales de flujo del agua y su fuerte contaminación son uno de los mayores problemas ambientales que enfrenta la cuenca Lerma-Chapala y particularmente su curso alto (Cotler, 2004). En los últimos 55 años el problema se acentuó, las políticas de desarrollo y las demandas de agua cada vez mayores del Distrito Federal y el Valle de Toluca, impulsaron las perforaciones y la construcción de importantes obras hidráulicas, que asociadas al crecimiento de diferentes corredores industriales (Cotler, 2004) ha ocasionado un fuerte deterioro de los recursos naturales (SEMARNAT, 2010) y en particular de los sistemas acuáticos. Este cambio de uso de suelo en las ciénegas de Lerma ha creado espacios potencialmente cultivables que el hombre ha aprovechado, como se observa en las matrices de transición (Cuadro 4). En 35 años el área inundable y con vegetación natural de Chignahuapan y Chiconahuapan se redujo cerca del 80% y en Chimaliapan un poco más del 40% (Cuadro 4) cediendo la mayoría de sus espacios a zonas de cultivo o urbanas. El incremento de la superficie para cultivo si bien no se tradujo en un aumento de la productividad, sí aceleró la fragmentación y reducción del área inundable de las ciénegas y en algunos casos modificó el modo de vida de los pobladores, ya que actividades como la pesca, caza, recolección y producción artesanal, que eran muy extendidas en la zona y conformaban el modo de vida lacustre, se han perdido o sólo son llevadas a cabo por un número reducido de personas (Albores, 1995).

Análisis de la vegetación

Actualmente la vegetación de la ciénegas de Lerma está dominada por 49 especies: 22 en Chignahuapan, 27 en Chimaliapan y 29 en Chiconahuapan (Zepeda *et al.*, 2012). Florísticamente Chiconahuapan es la ciénega más rica, diversa (H') y con los valores de equidad (J') más altos (*Ibid.*). La riqueza de

Cuadro 4. Correlación de Pearson (valor de r) entre el área de las categorías de cobertura del 2008 y la diversidad de las ciénegas de Lerma, en negritas valores significativos (p<0.05)

	Urbano	Cuerpos de Agua	Agrícola	Tulares	Vegetación acuática
Diversidad H'	-0.249112	-0.401854	-0.999689	-0.776888	-0.215727
Riqueza	0.179940	0.019147	-0.918022	-0.441274	0.213595

especies no se correlacionó con el área que en 2008 presentaron las categorías de cobertura en cada ciénega (Cuadro 4), sin embargo, los valores de diversidad de Shannon (H') de la vegetación acuática (Chignahuapan: $H' = 2.6$ y $J' = 0.858$; Chimaliapan: $H' = 2.7$ y $J' = 0.833$; Chiconahuapan: $H' = 2,9$ y $J' = 0.864$ en Zepeda *et al.* (2012) sí mantuvieron una fuerte correlación negativa y significativa con la cobertura agrícola (Cuadro 4).

En el AC simple entre las ciénegas y los valores de importancia de las especies de la vegetación (Figura 5), el 99% de la variabilidad se asimila en los dos primeros ejes, el primero separa a la flora de Chignahuapan y Chiconahuapan, el segundo segrega a la flora de la ciénega de Chimaliapan de las otras dos. Las especies se ordenan creando grupos o asociaciones más o menos definidas en cada humedal y muestran la heterogeneidad florística de

las ciénegas, las especies cercanas a los ejes de la ordenación presentan valores intermedios y podrían considerarse de amplia distribución.

La ordenación de la flora de cada ciénega en función de la frecuencia de las formas de vida, tipo y hábito de las especies, separa del lado derecho a la flora de Chignahuapan y del lado izquierdo a la de Chiconahuapan y Chimaliapan (Figura 6). La distribución del tipo de plantas en cada ciénega puede asociarse a las variaciones en el nivel de agua. Chimaliapan y Chiconahuapan al presentar niveles de inundación más constantes, y en algunos casos superiores a los 70 cm durante la mayor parte del año (Pérez, 2005), presentan una mayor frecuencia de especies acuáticas cuyas características de historias de vida implican tolerar eventos de estrés, como la inundación por largos periodos. Mientras que Chignahuapan al presentar un nivel de inundación

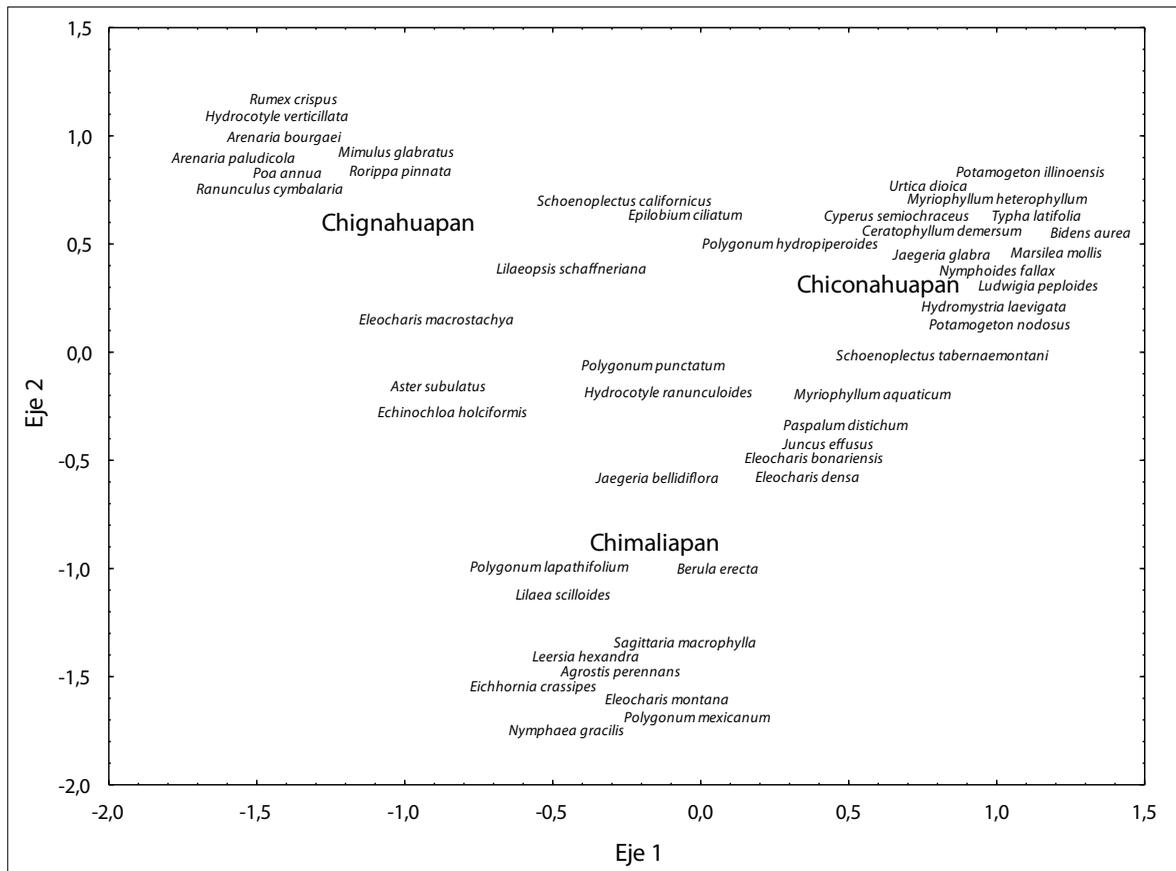


Figura 5. Análisis de Correspondencia simple entre las ciénegas de Lerma y los valores de importancia de las especies de la vegetación. Eje 1=56% de la inercia, Eje 2 = 43% de la inercia. $Ch^2=668$; $p<0.0001$.

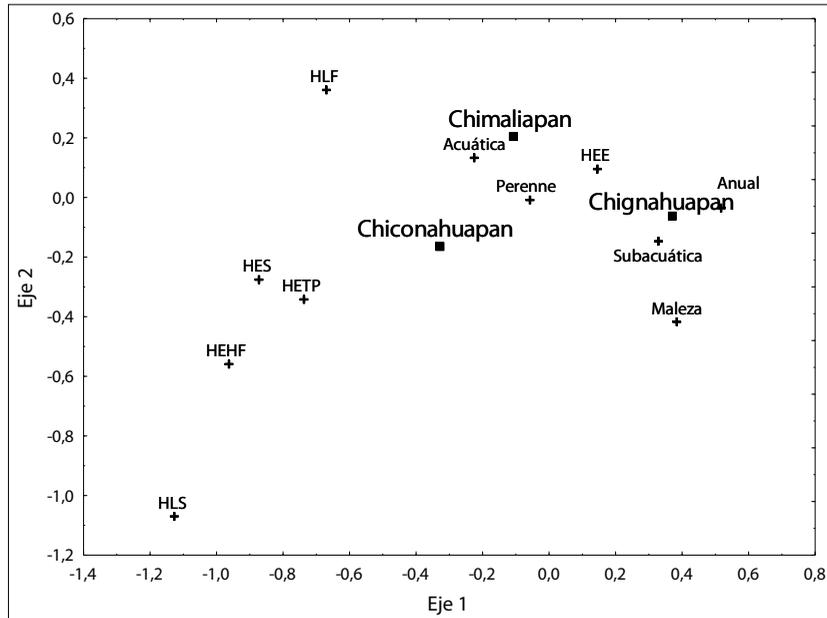


Figura 6. Análisis de Correspondencia simple entre las ciénegas de Lerma y la frecuencia del tipo (perenne y anual), hábito (acuática, subacuática y maleza) y forma de vida (HEE = Hidrófita enraizada emergente, HEHF = Hidrófita enraizada de hojas flotantes, HES = Hidrófita enraizada sumergida, HETP = Hidrófita enraizada de tallos postrados, HLF = Hidrófita libre flotadora, HLS = Hidrófita libre sumergida) de las especies de la vegetación. Eje 1=78% de la inercia, Eje 2 = 21% de la inercia. $Ch^2=115$; $p<0.0001$.

inferior y menos permanente (*Ibid.*), exhibe una mayor frecuencia de subacuáticas y de especies con amplia tolerancia a las variaciones ambientales y a la perturbación como las malezas.

Dado que el análisis del cambio de uso de suelo se hizo sobre el área que las ciénegas cubrían en 1973, era de esperarse que la clase de vegetación acuática presentara los valores de intercambio más altos (Figura 5) y que fuera el componente más dinámico. Esto refleja en parte la resistencia y resiliencia del ecosistema ante disturbios (Sánchez *et al.*, 2007), pero sobre todo refleja el mal manejo del área y la falta de planeación de los asentamientos humanos. Como consecuencia, zonas urbanas y agrícolas actualmente establecidas (por ejemplo de Lerma, San Mateo Atenco, Ocoyoacac y Metepec) han tenido importantes pérdidas por inundaciones ya que se han desarrollado en áreas que fueron lacustres (COEM, 2011). Si estos espacios se mantienen inundados por algún periodo, ciertas especies de plantas acuáticas o subacuáticas tienden a colonizarlos por sus adaptaciones y características de historia de vida. En este sentido las transiciones de áreas urbanas y agrícolas hacia zonas de vegetación acuática que se observan en los resultados (Figura 4, Cuadro 2), podrían considerarse como incipientes fenómenos de recuperación de las

comunidades naturales y sugieren la habilidad y capacidad del sistema para regresar a un estado previo a la perturbación. Sin embargo, si ésta continúa alterando el sistema acuático más allá del límite que éste puede soportar, se perderán irreversiblemente las posibilidades de recuperar su riqueza, estabilidad y funcionalidad (Sánchez *et al.*, 2007).

La antropización de la cubierta vegetal reduce la diversidad y la calidad del sistema (Torbick *et al.*, 2006; Sánchez *et al.*, 2007). En estas ciénegas, a consecuencia del deterioro se han extinguido especies de flora (*Sparganium americanum* y *Spiranthes gramínea* (Ramos, 2000) y de fauna (*Quiscalus palustris*; Haeming, 2010). También están amenazadas o en peligro de extinción varias especies endémicas, entre ellas destacan: aves (*Anas platyrhynchos diazi*, *Geothlypis speciosa* y *Coturnicops noveboracensis*), anfibios (*Ambystoma lermaensis*), peces (*Chirostoma riojai* y *Algansea barbata*) y plantas (*Sagittaria macrophylla* y *Nymphaea gracilis*) (SEMARNAT, 2002). La pérdida de tulares y la disminución del nivel de agua en las ciénegas de Lerma está favoreciendo un estado sucesional en la vegetación, relativa y temporalmente más estable, pero depauperado en la riqueza de especies y de funciones ecosistémicas (Sánchez *et al.*, 2007). Los cambios en el uso de suelo están modificando la

composición de las comunidades de plantas acuáticas y tienden a desplazar a la flora local o a reducir su área de distribución natural. Esto puede estar sucediendo con plantas como *Ceratophyllum demersum*, *Myriophyllum heterophyllum*, *Potamogeton* sp., *Sagittaria macrophylla* y *Nymphaea gracilis*, que sólo se pueden observar en una o dos ciénegas (Figura 5), en algunos casos éstas son raras o han desaparecido localmente (Ramos, 2000). Los disturbios han favorecido también el desarrollo de malezas, tolerantes a las nuevas condiciones ambientales y fuertes competidoras frente a las especies nativas.

CONCLUSIÓN

El análisis del cambio de uso de suelo de 1973 a 2008 en las tres ciénegas de Lerma demuestra que aunque los procesos de transformación varían espacial y temporalmente (Cuadro 4), la tendencia general es la pérdida de zonas de agua abierta y tulares, que tienden a transformarse en zonas con nivel de inundación menor, favoreciendo el crecimiento de una flora hidrófita de menor talla y adaptada a los disturbios, que posteriormente es sustituida por campos de cultivo y a continuación por espacios urbanos (Figura 6). Sin considerar el fuerte deterioro de los humedales previo a 1973 (Martínez, 1993), las tasas de cambio y permanencia del paisaje indican que el ritmo de destrucción de las ciénegas de Lerma fue más intenso de 1973 a 1989. Desafortunadamente en 2008 estos procesos de deterioro se mantenían (Cuadros 3 y 4), pese a que desde 2002 estaban protegidos por decreto (SEMARNAT, 2002).

Las ciénegas de Lerma son un ejemplo de que el cambio de uso de suelo afecta directamente a los seres humanos en formas que van más allá del uso inmediato del suelo. La extracción de elevados volúmenes de agua del acuífero (422.4 millones de m³/año) ha reducido el flujo de los manantiales y causado su sequía; ha generado además el abatimiento gradual de los niveles piezométricos de los acuíferos profundos (Martínez, 1993). A esto se asocian hundimiento, agrietamiento del terreno y reducción progresiva del área inundada de las ciénegas (Martínez, 1993; García *et al.*, 2003).

Actualmente los humedales se mantienen sólo de algunos pequeños manantiales y de los escasos escurrimientos superficiales de la cuenca natural (Antón y Díaz, 2002). Este cambio de uso de suelo está impactando también a elementos meteorológicos de la zona (Maderey y Jiménez, 2001). Desafortunadamente, su futuro es desalentador ya que las proyecciones de las tendencias de crecimiento poblacional prevén una mayor presión sobre los recursos naturales en 2030 (SEMARNAT, 2010).

La vegetación de los humedales de Lerma aún puede considerarse diversa (Zepeda *et al.*, 2012) y su permanencia podrá favorecer la salud, el equilibrio y desarrollo de la vida acuática, así como la conservación del hábitat y su biodiversidad. Desafortunadamente está sometida a una presión intensa y sus áreas son las que mayor extensión han perdido (Figura 5). Su flora está compuesta por una mezcla de componentes típicos de cuerpos de agua y de ambientes perturbados y su diversidad disminuye al incrementar las zonas agrícolas. La dominancia de pocas especies y la presencia de plantas oportunistas terrestres indican un estado de degradación variable, producto del régimen histórico y actual de disturbio al que han sido sometidas. Las ciénegas de Chignahuapan y Chiconahuapan han tenido un mayor deterioro de sus ambientes naturales (Figuras 5 y 6), pero Chignahuapan está más deteriorada florísticamente, pues presentó la menor diversidad, menor número de formas de vida y de especies propias de humedales, así como el mayor número de malezas tolerantes (Figuras 5 y 6). Chiconahuapan es la ciénega más reducida, pero mantiene un nivel de agua superior a 1 m lo que favorece una flora ligeramente más rica, más diversidad y mayor número de especies adaptadas a ambientes anegados. Algunas zonas de esta ciénega y la de Chimaliapan mantienen elementos florísticos propios de la región que podrían usarse en programas de restauración de la vegetación acuática en zonas aledañas.

La permanencia de la ciénegas del Lerma es fundamental para mantener la diversidad regional y los servicios ambientales que éstas y su vegetación ofrecen; como la recarga de mantos freáticos, el reciclamiento de nutrientes, la retención de metales pesados y el control de inundaciones (Torbick *et al.*,

2006). Si bien una buena parte continúa anegada y cubierta de vegetación acuática, cada vez será más difícil mantener la estructura y los procesos naturales de los ecosistemas acuáticos que aún conservan, si el deterioro progresivo continúa manteniendo un paisaje seco, dominado principalmente por campos de cultivo y zonas urbanas.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial a la Universidad Autónoma del Estado de México que patrocinó esta investigación y al Consejo Mexiquense de la Ciencia y la Tecnología por la beca otorgada a la primera autora. Al Dr. Javier Manjarrez quien revisó el manuscrito y apoyó en el procesamiento del material. A los revisores anónimos por sus enriquecedores comentarios y aportaciones.

REFERENCIAS

- Albores, Z. B. A. (1995), *Tules y Sirenas. El impacto ecológico y cultural de la industrialización del Alto Lerma*, Colegio Mexiquense, A. C. y Gobierno del Estado de México, Toluca.
- Antón, D. y C. Díaz D. (2002), *Sequía en un mundo de agua. "Los humedales del alto Lerma"*, 25 de marzo de 2011 [<http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/sequia/t-cap06.html>].
- Antrop, M. (2005), "Why landscapes of the past are important for the future", *Landscape and Urban Planning*, no. 70, pp. 21-34.
- Castelán, V. R., C. J. Ruiz, F. G. Linares, A. R. Pérez y F. V. Tamariz (2007), "Dinámicas de cambio espacio temporal del uso del suelo de la subcuenca del río San Marcos, Puebla, México", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 64, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 78-89.
- COEM (2011), *Atlas de inundaciones, Cuenca del Río Lerma*, Comisión del Agua del Estado de México, Gobierno del Estado de México, 4 de mayo [<http://www.edomexico.gob.mx/atlasdeinundaciones/html/cuencariolerma.htm>].
- Cotler, H. (2004), "La cuenca Lerma Chapala: algunas ideas para un antiguo problema", *Gaceta Ecológica*, núm. 71, pp. 5-10.
- DeFries, R., J. A. Foley and G. P. Asner (2004), "Land use choice: balancing human needs and ecosystem function", *Frontiers in Ecological Environment*, vol. 2, no. 5, pp. 249-259.
- ESRI (1992), *Arc View Gis 3.3 Program*, Environmental System Research Institute Inc. Redlands, California, USA.
- García, S. E. M., M. B. E. Hernández y M. A. Mujica (2003), *Algunas variaciones climáticas en el curso alto de la cuenca del río Lerma, como una respuesta a los cambios del paisaje*, tesis de Licenciatura, Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca.
- Haeming, P. D. (2010), "Ecology and ethnobiology of the slender-billed grackle. *Quiscalus palustris*", *Journal of Ornithology*, no. 151, pp. 391-399.
- López, G. (1999), *Cambio de uso de suelo y crecimiento urbano en la ciudad de Morelia*, tesis de Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Biología, Morelia, Michoacán, México.
- Maderey Rascón, L. E. y A. Jiménez (2001), "Alteraciones del ciclo hidrológico en la parte baja de la cuenca alta del río Lerma por la transferencia de agua a la Ciudad de México", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 45, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 24-38.
- Martínez C., Y. I. (1993), *La evolución de la superficie de las ciénegas de Lerma y sus principales repercusiones físicas, biológicas y humanas*, tesis de Licenciatura, Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca.
- Mendoza, M., G. Bocco, E. López y M. Bravo (2002), "Implicaciones hidrológicas del cambio de cobertura vegetal y uso de suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 49, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 92-117.
- Mitsch, W. J. and J. G. Gosselink (2007), *Wetlands*, 4a ed., John Wiley and Sons. Inc. New York.
- Moreno, C. E. (2001), *Métodos para medir la biodiversidad*, Manuales y Tesis, Sociedad Entomológica Aragonesa, vol. 1, Zaragoza.
- Pérez Ortiz, G. (2005), *Diagnóstico ambiental como base para la rehabilitación de las Ciénegas de Lerma, Estado de México*, tesis de Maestría en Ciencias Biológicas, UNAM, México.
- Pérez Ortiz, G. y M. Valdez A. (2006), "El uso de la biodiversidad en las ciénegas del Lerma", Cotler, A. H., M. Mazari H. y J. De A. Sánchez, *Atlas de la Cuenca Lerma Chapala*, Instituto Nacional de Ecología (INESEMARNAT), México, p. 78.

- Pontius, R. G., E. Shusas and M. McEachern (2004). "Detecting important categorical land changes while accounting for persistence", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, no. 101, pp. 251-268.
- Puyravaud, J. P. (2003), "Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation", *Forest Ecology and Management*, vol. 177, no. 1-3, pp. 593-596.
- Ramos V., L. J. (2000), *Estudio de la flora de la vegetación acuática vascular de la cuenca alta del río Lerma, en el Estado de México*, tesis de Maestría en Ecología y Ciencias Ambientales, UNAM, México.
- Ramsar List (2006), *The list of the wetland of international importance*, 20 de September 2011 [http://www.ramsar.org/cda/en/ramsar-documents-list/main/ramsar].
- Reyes, H., R. M. Aguilar, R. J. R. Aguirre e I. Trejo (2006), "Cambios en la cubierta vegetal y uso del suelo en el área del proyecto Pujal-Coy, San Luis Potosí, México. 1973-2000", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 59, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 26-42.
- Research Systems (2005), *ENVI 4.2 Program*, ITT Visual Information Solutions Inc. Boulder, Colorado, USA.
- Sánchez, O., M. Herzing, E. Peters, R. Martínez y L. Zambrano (eds.; 2007), *Perspectivas sobre la conservación de ecosistemas acuáticos en México*, Instituto Nacional de Ecología, México.
- Schulz, J. J., L. Cayuela, C. Echeverría, J. Salas and J. M. R. Benayas (2010), "Monitoring land cover change of the dryland forest landscape of Central Chile (1975-2008)", *Applied Geography*, no. 30.
- SEMARNAT (2002), "Decreto por el que se declara área natural protegida ... la región conocida como ciénegas de Lerma en el Estado de México", *Diario Oficial de la Federación*, 27 de noviembre de 2002, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, pp. 4-12.
- SEMARNAT (2010), *Plan maestro para la recuperación de la Cuenca Alta del río Lerma*, Diagnóstico Ecosistémico, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Gobierno del Estado de México.
- Shalaby, A. and R. Tateishi (2007), "Remote sensing and GIS for mapping and monitoring land covers and land use change in the Northwestern coastal zone of Egypt", *Applied Geography*, no. 27, pp. 28-41.
- StatSoft (2004), *STATISTICA 7 for Windows*, StatSoft Inc., Tulsa, Oklahoma, USA.
- Torbick, N. M., J. Qi, G. L. Roloff and R. J. Stevenson (2006), "Investigating impacts of land use land cover change on wetlands in the Muskegon River Watershed, Michigan. USA", *Wetlands*, no. 26, pp. 1103-1113.
- Velázquez, A., J. F. Mas, J. R. Díaz Gallegos, R. Mayorga Saucedo, P. C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco, E. Ezcurra y J. L. Palacio (2002), "Patrones y tasas de cambio de uso de suelo en México", *Gaceta Ecológica*, núm. 62, pp. 21-37.
- Zepeda Gómez, C., A. Lot Helgueras, X. Antonio Nemiga y D. Madrigal Uribe (2012), "Florística y diversidad de las ciénegas del río Lerma Estado de México, México", *Acta Botánica Mexicana*, núm. 98, pp. 23-49.