



7

GEOGRAFÍA PARA EL SIGLO XXI SERIE: LIBROS DE INVESTIGACIÓN

Estudios sobre los remanentes de cuerpos de agua en la Cuenca de México

Raúl Aguirre Gómez
Coordinador



Estudios sobre los remanentes de cuerpos de agua en la Cuenca de México

Raúl Aguirre Gómez
Coordinador



México, 2010

Estudios sobre los remanentes de cuerpos de agua en la Cuenca de México /coord. Raúl Aguirre Gómez. -- México : UNAM, Instituto de Geografía, 2010
111 p. : il. ; 22 cm. -- (Geografía del Siglo XXI. Serie libros de investigación ; 77)
Incluye bibliografías
ISBN 978-607-02-1988-7

1. Agua – Recursos naturales – México (D.F.). 2. Desarrollo de recursos hidrológicos – México (D.F.). 3. Abastecimiento de agua - México (D.F.). I. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geografía. II. Aguirre Gómez, Raúl. III. Ser.

333.910097252-scdd20

Biblioteca Nacional de México

Estudios sobre los remanentes de cuerpos de agua en la Cuenca de México
Primera edición, noviembre de 2010

D.R. © 2010 Universidad Nacional Autónoma de México

Ciudad Universitaria
Coyoacán, 04510
México, D. F.
Instituto de Geografía
www.unam.mx
www.igeograf.unam.mx

Prohíbida la reproducción parcial o total
por cualquier medio, sin la autorización escrita
del titular de los derechos patrimoniales.

La presente publicación presenta los resultados de una investigación científica
y contó con dictámenes de expertos externos, de acuerdo con las normas editoriales
del Instituto de Geografía.

Geografía para el siglo XXI (Obra general)
Serie Libros de investigación
ISBN (Obra general): 970-32-2965-4
ISBN: 978-607-02-1988-7

Impreso y hecho en México

ÍNDICE

Prólogo.....	9
Introducción.....	11
Capítulo 1. Evolución del crecimiento espacial de la Ciudad de México en relación con las regiones geomorfológicas de la Cuenca de México.....	15
<i>María Teresa Gutiérrez de MacGregor Jorge González Sánchez</i>	
Capítulo 2. Eutroficación y restauración de la calidad del agua de los canales de Xochimilco.....	41
<i>Martín López Hernández , María Guadalupe Ramos Espinosa, Patricia Martínez Cruz y Antonio Flores Macías</i>	
Capítulo 3. Análisis hiperespectral de tres remantes de cuerpos de agua en la Cuenca de México.....	55
<i>Raúl Aguirre Gómez</i>	
Capítulo 4. Análisis espectral del lago de Chalco a través de imágenes satelitales.....	77
<i>Olivia Salmerón García</i>	
Capítulo 5. Laguna de Tecocomulco y sus variables climáticas, hidrológicas y de vegetación a través de imágenes de satélite.....	91
<i>Gabriela Gómez Rodríguez y Guadalupe de la Lanza Espino</i>	

Prólogo

Este libro surge de la necesidad de mostrar ejemplos interesantes de trabajos que se realizan en nuestras universidades por un conjunto de especialistas altamente capacitados. Para lograr esto se cuenta con la invaluable participación de investigadores de los Institutos de Geografía, de Biología y de Ciencias del Mar y Limnología de nuestra Universidad Nacional Autónoma de México, así como de los Departamentos de Producción Agrícola y Animal y de Sistemas Biológicos de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. El total de contribuciones, que involucró a diez especialistas, permitió la conformación de cinco capítulos.

La obra está estructurada en tres secciones: la primera corresponde al desarrollo histórico de la transformación lacustre de la Cuenca en la megalópolis actual; la segunda sección está enfocada a un estudio de la calidad del agua del lago de Xochimilco y, la última parte, a tres estudios donde se aplican técnicas de percepción remota en algunos de los cuerpos de agua aún existentes en la Cuenca.

Así, en el primer capítulo, Gutiérrez de MacGregor y González Sánchez presentan un trabajo cuyo objetivo es dar a conocer cómo el crecimiento demográfico espacial de la Ciudad de México ha impactado la Cuenca de México. El capítulo abarca desde la época prehispánica hasta la actualidad. Aun cuando éste no es un capítulo que incluya técnicas de percepción remota en su desarrollo, es de gran utilidad para tener el contexto histórico y entender el proceso de desecación del sistema lacustre original de la Cuenca y es, además, un gusto que quería darme con la participación siempre inteligente de la muy querida doctora Gutiérrez de MacGregor.

En el segundo capítulo, López y colaboradores presentan un estudio físico-químico sobre la eutroficación y restauración de la calidad del agua de los canales de Xochimilco. Este trabajo logra evaluar la fluctuación de fósforo y nitrógeno del agua de los canales en las épocas de sequía y lluvia, empleando ríos artificiales para estudiar el efecto de aguas tratadas sobre microalgas y observar el efecto de un humedal artificial en la remoción de contaminantes de las aguas del Canal Nacional. Este trabajo toca tangencialmente el uso de imágenes satelitales y de sistemas de posicionamiento global, pero marca la pauta para introducir la tercera parte del libro dedicada al uso de sensores remotos.

En el tercer capítulo, Aguirre muestra un estudio empleando técnicas de percepción remota hiperespectral en tres lagos: Tecocomulco, Xochimilco y Zumpango, logrando establecer diferencias espectrales entre cuerpos de agua eutróficos como Xochimilco y Zumpango, y embalses con importante carga de sedimentos. Este capítulo es importante por dos razones fundamentales: primero, porque muestra la utilización de sensores remotos poco convencionales pero con una gran calidad espectral y, segundo, porque integra tres cuerpos de agua situados en los extremos norte y sur de la Cuenca.

En el capítulo cuatro Salmerón presenta un análisis interesante del relicto del lago de Chalco situado al sureste de la Cuenca utilizando imágenes de satélite Landsat ETM+ y SPOT de distintos años. Su estudio permite analizar la composición espectral de cuatro regiones fácilmente identificables en el lago. Esta identificación es posible gracias a las características ópticas de cada región, las cuales varían en función del material predominante: fitoplancton, sustancia amarilla, sedimentos o materia orgánica proveniente de aguas negras.

En el capítulo final se incluye un trabajo integral sobre el lago de Tecocomulco, escrito con gran conocimiento del tema por Gómez Rodríguez y De la Lanza Espino; este trabajo es un excelente ejemplo sobre los cambios importantes que ha experimentado el lago de Tecocomulco y que pueden evaluarse considerando imágenes de satélite en tres décadas. Las autoras observan cambios en el espejo de agua donde hay un incremento de áreas desecadas y vegetación asociada al nivel de agua.

Por último, quisiera agradecer la contribución de todos los autores para hacer viable la creación de esta obra y por el tiempo dedicado a esta tarea. Esta obra es posible gracias al apoyo de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico, a través del financiamiento del proyecto de investigación PAPIIT: Análisis y caracterización de los cuerpos de agua de la Cuenca de México mediante sensores remotos y un sistema de información geográfica. Gracias también a la Sección Editorial del Instituto de Geografía en particular, por el apoyo para la publicación de esta obra. Finalmente, deseo manifestar mi reconocimiento al gran trabajo, profesional y a conciencia, desarrollado por el conjunto de árbitros anónimos que ayudaron a enriquecer esta obra con sus comentarios, sugerencias y análisis crítico.

Raúl Aguirre Gómez
Laboratorio de Análisis Geoespacial,
Instituto de Geografía,
Universidad Nacional Autónoma de México
enero de 2010

Introducción

La Cuenca de México es actualmente el asiento de una de las megalópolis más pobladas y extensa del mundo, donde tienen jurisdicción política el Distrito Federal y los estados de México, Hidalgo, Tlaxcala y Puebla. Es difícil imaginar que hasta hace poco más de 500 años era un extenso sistema lacustre conformado por cinco lagos: Texcoco, Zumpango, Xaltocan –de agua salada– y Chalco y Xochimilco –de agua dulce. Estos lagos fueron el asiento de muchas culturas mesoamericanas.

Hidrográficamente, la Cuenca de México es endorreica y está localizada sobre el paralelo 19° de latitud norte, la cual coincide con la situación del Eje Neovolcánico Transversal. Está rodeada por cadenas montañosas: al este por la Sierra Nevada, al oeste por la Sierra de las Cruces, al sur por la Sierra del Ajusco-Chichinautzin, y al norte por la de Pachuca y Texontlalpan.

En tiempos remotos tuvo un desagüe natural al Río Balsas; sin embargo, la actividad geológica que dio origen a la serranía del Ajusco cerró la Cuenca por el sur y contribuyó a la formación de los llamados lagos del Anáhuac. Los cinco lagos de la Cuenca de México fueron drenados para reducir las inundaciones y han desaparecido virtualmente. De ellos quedan algunos relictos: en el sur se encuentran varios canales remanentes de los originales lagos de Xochimilco y de Chalco; en el norte aún permanecen porciones de los lagos de Zumpango, de Guadalupe y de Tecocomulco, entre los principales. La mayoría de los ríos que alimentaban la zona lacustre son de carácter torrencial con avenidas de corta duración. Sin embargo, también hay algunos ríos verdaderos y algunos manantiales. Dadas las características de la Cuenca, el nivel de los lagos era diferente así como la calidad de sus aguas.

Con los primeros asentamientos humanos iniciaron las modificaciones en la región. Durante la época prehispánica aproximadamente desde el 200 a.C. hasta el 1200 d.C., las civilizaciones teotihuacana, tolteca y chichimeca, y particularmente los mexicas (de 1200 a 1521 d.C.) se introdujeron algunas de las modificaciones más notables. No obstante, la zona lacustre de la Cuenca de México se mantuvo dentro de un delicado equilibrio ecológico, con una transformación mínima, ya que era parte fundamental en la economía de sus pobladores, tanto

por permitirles tener una agricultura independiente del régimen de lluvias como por la presencia de la fauna lacustre, la cual tenía un lugar primordial en la alimentación de los pueblos del lago (pesca de charales, consumo de aves acuáticas, aprovechamiento de acociles); de esta manera los indígenas lograron un desarrollo acorde al ambiente y a los recursos naturales.

Se estima que la zona lacustre tenía una extensión original superior a los 1 500 km². Actualmente las obras de drenaje y las limitaciones en la capacidad de captación de agua de lluvias en las laderas constituyen una fuerte perturbación en el ciclo hidrológico de la región. El periodo que abarca desde la llegada de los españoles en 1519 hasta nuestros días es en el cual la Cuenca ha sufrido las transformaciones más substanciales, alterando su configuración original.

A partir de la conquista da comienzo la destrucción del sistema hidráulico prehispánico. Sin embargo, es a partir del siglo XVII, hasta el presente, que tienen lugar grandes obras de ingeniería como el tajo de Nochistongo, el Gran Canal, los túneles de Tequisquiác y el sistema de drenaje profundo. Estas obras desaguan artificialmente y vacían prácticamente la Cuenca. En 1519 el lago aún tenía más de 10 m de profundidad en algunos sitios. Para 1864 sólo subsistía alrededor de 230 km² de la extensión original y para 1891 tan sólo restaban 95 km². Actualmente, de la extensa zona lacustre sólo quedan los siguientes remanentes: *a*) el lago de Texcoco, de agua muy salada y alcalina, cuyo espejo de agua varía anualmente de manera importante y también en función de la época del año; *b*) el lago de Zumpango, con una superficie máxima de unos 15 km² de agua salobre; *c*) una red de canales de agua dulce en las zonas de Xochimilco y en los alrededores de Chalco y Mixquic, las cuales se conservan artificialmente con fines turísticos, y *d*) el lago de Tecocomulco, en el estado de Hidalgo.

Por otro lado, las técnicas de percepción remota (PR) han mostrado su utilidad en el estudio de cuerpos de agua principalmente en el análisis de la eutrofización antropogénica. La interpretación de fotografías aéreas acopladas con observaciones hechas en campo ha probado ser, a lo largo del tiempo, una técnica efectiva en el mapeo de macrofitas acuáticas.

La concentración de algas flotando libremente es un buen indicador del estado trófico de los lagos. Por ejemplo, la excesiva concentración de cianobacterias es común en condiciones eutróficas. Estacionalmente, los florecimientos de cianofitas o cianobacterias tienen lugar en condiciones de agua caliente a finales del verano, mientras que las diatomeas son más comunes en aguas frías de primavera y otoño. Las algas verdes, por su parte, están presentes en cualquier momento del ciclo estacional de los lagos. Ahora bien, dado que los distintos tipos de algas tienen un patrón espectral muy diverso, es posible, en principio, diferenciarlos en

fotografías aéreas o imágenes satelitales. Sin embargo, las longitudes de onda correspondientes al pico de reflectancia de las cianofitas y de las clorofitas están, con frecuencia, espectralmente traslapadas. Esta característica obliga a la utilización de sensores con bandas muy finas o hiperespectrales para maximizar las diferencias en sus respuestas espectrales. Las fotografías aéreas multibanda, las imágenes multiespectrales o bien las señales hiperespectrales se han utilizado para estudiar la concentración de clorofila en los cuerpos de agua. Con el aumento en la concentración de este pigmento, se observa un incremento importante en la reflectancia en la banda verde y un decremento significativo en las bandas azul y roja.

La clorofila *a* es un fitopigmento que está presente en todos los grupos de algas en sistemas marinos y continentales de aguas dulces y salobres. Gracias a sus características espectrales en el intervalo visible la clorofila *a* puede identificarse de manera directa con instrumentos ópticos. En sistemas acuáticos oligotróficos la presencia de clorofila *a* se puede determinar mediante el cociente azul-verde entre las longitudes de onda 440 y 550 nm. Por otro lado, estudios de producción en ecosistemas marinos y de aguas dulces han demostrado que la señal retro-reflejada en el intervalo de longitudes de onda entre 670 y 740 nm permite estimar la concentración de este pigmento. En este rango espectral, la información de la clorofila *a* no está influenciada por la sustancia amarilla, otros pigmentos y sedimentos en suspensión. Estos últimos elementos pueden, a su vez, ser detectados con sensores remotos lo cual permite realizar estimación de sus concentraciones.

La evaluación con sensores remotos, de los cuerpos de agua remanentes en la Cuenca de México es una tarea relevante y pertinente. Es relevante porque es indispensable estudiar estos ecosistemas desde diferentes perspectivas con la idea de recuperarlos y/o mantenerlos en un estado saludable, y es pertinente porque actualmente se están realizando esfuerzos encaminados a su conservación.

Raúl Aguirre Gómez
enero 2010

Capítulo 1. Evolución del crecimiento espacial de la Ciudad de México en relación con las regiones geomorfológicas de la Cuenca de México

María Teresa Gutiérrez de MacGregor

Jorge González Sánchez

Departamento de Geografía Social, Instituto de Geografía

Universidad Nacional Autónoma de México

Introducción

El objetivo de este trabajo es dar a conocer el impacto del crecimiento demográfico espacial de la Ciudad de México, sobre el territorio que ocupa la Cuenca de México, por considerar que, desde la época prehispánica hasta la actualidad, la acción antrópica ha modificado profundamente su medio, principalmente debido a la rápida urbanización ocurrida a partir de mediados del siglo XX, que ha logrado que la mancha urbana rebase las barreras naturales que durante muchos años limitaron su crecimiento espacial.

Para realizar este estudio, lo primero que uno se pregunta es ¿cuándo? y ¿cómo? se formó el relieve de la Cuenca de México. Para una respuesta haya que recurrir al trabajo realizado por Zamorano (2005:18-20) en el que presenta una descripción del origen de la Cuenca de México:

La Cuenca de México es una altiplanicie rodeada de montañas volcánicas de edad plio-cuaternaria que se localiza en la parte centro oriente del CVTM (Cinturón Volcánico Trans-Mexicano), entre los meridianos 98°15'–99°30' y los paralelos 19°00'–20°15'. Su altitud varía de 2 240 msnm en el sur, a 2 390 msnm al norte; la longitud máxima es de 110 km, de norte a sur, y la mínima de 80 km, de este a oeste; su área aproximada es de 9 600 km².

La Cuenca se encuentra situada en el límite meridional de la Altiplanicie Mexicana rodeada de montañas: al norte la de Pachuca, al noreste la de Chico-

nautla, al oriente, citadas de norte a sur: las de Tepozán, Calpulalpan, Río Frío y los volcanes de Tlálóc y Telapón que forman parte de la Sierra Nevada; esta última localizada en su extremo sureste; en ella destacan los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl; al sur la Cuenca está limitada por la Sierra de Chichinautzin; en el extremo suroeste las sierras de Ajusco y Zempoala, continuando al poniente, citadas de sur a norte: las sierras de Las Cruces, Monte Alto, Monte Bajo y Tepotzotlán-Tezontlalpan (Figura 1).

Según Zamorano (*Ibid.*:34-42), son cuatro las regiones geomorfológicas que forman la Cuenca de México:

- a) Relieve montañoso de origen volcánico: incluye las mayores elevaciones de la Cuenca arriba mencionadas, las cuales definen su parteaguas y su forma; en esta región también se presentan elevaciones menores al interior de la misma, entre otras, la sierra de Guadalupe y la sierra de Santa Catarina, las cuales interrumpen la continuidad de la planicie.
- b) Piedemonte: se reconoce como una superficie inclinada, marginal a las cadenas montañosas que definen sus límites; su origen tiene relación con la alternancia de numerosas fases de erosión-sedimentación y volcánica acumulativa. Su desarrollo depende en gran medida del tiempo que han quedado expuestos los conjuntos montañosos a la actividad de los distintos procesos de modelado.
- c) Planicies proluviales-lacustres: se caracterizan por presentar una pendiente que no supera los 5° de inclinación; están constituidas por detritos que han sido transportados por ríos estacionales. En general, se trata de acarrees que provienen principalmente del piedemonte y son depositados en las riveras lacustres a manera de amplios abanicos. De esta manera se define una superficie de transición entre el piedemonte y la siguiente región.
- d) Planicie lacustre: ocupa el nivel más bajo de la Cuenca de México, es una superficie casi horizontal, con una altitud promedio de 2 240 msnm. Su origen se explica a partir de un continuo relleno de todo este territorio, motivado por la aparición de la sierra del Chichinautzin, que fungió como una represa natural.

Las áreas preferidas para los asentamientos humanos dentro de la Cuenca, desde la época prehispánica, han sido las planicies lacustres y proluviales-lacustres (Figura 1).

Hace un millón de años la Cuenca estaba abierta en su porción sur, en esta misma dirección drenaba un sistema fluvial que estaba integrado por los ríos

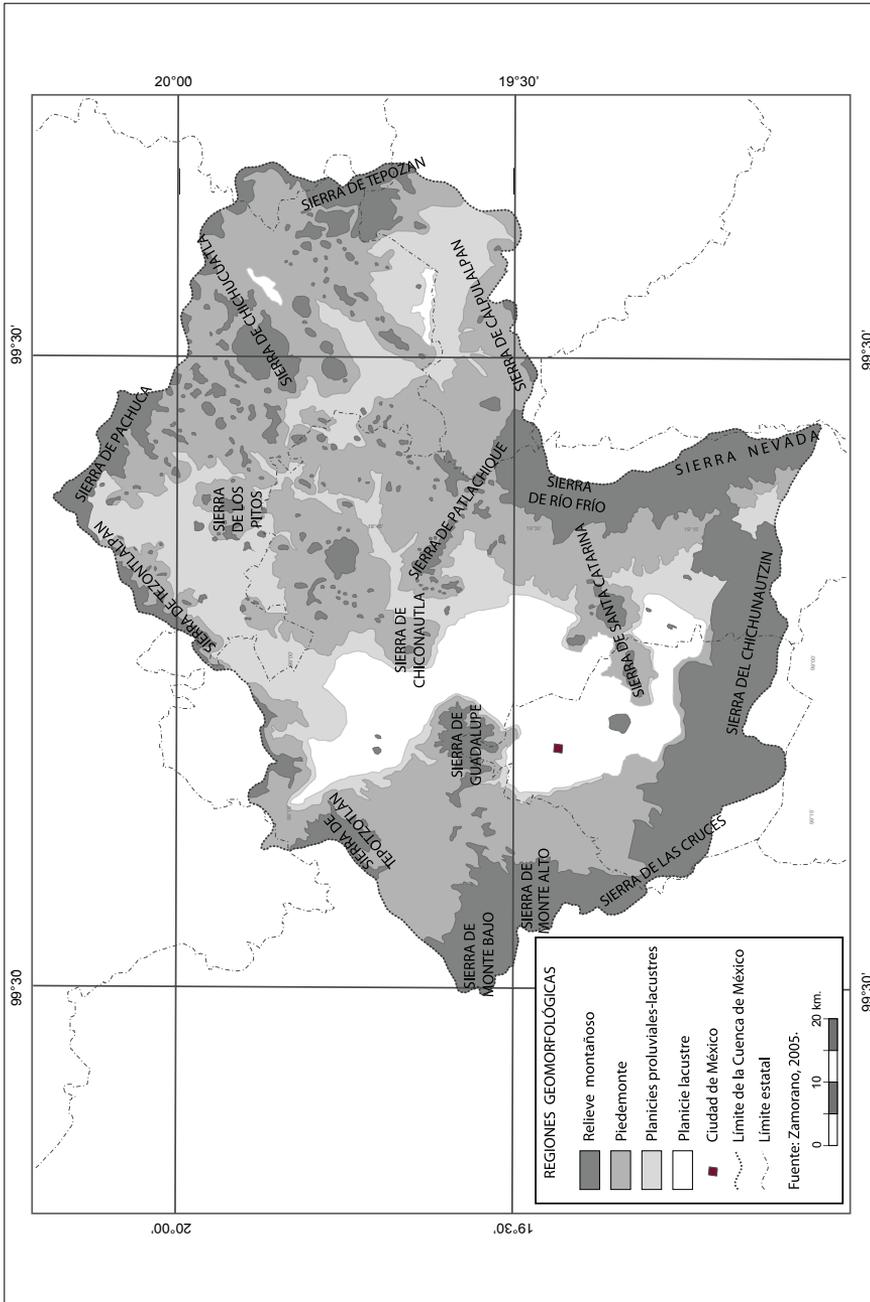


Figura 1. Principales regiones geomorfológicas de la Cuenca de México.

Cuernavaca y Cuautla. El primero drenaba la porción occidental y era alimentado por numerosos escurrimientos provenientes de la Sierra de las Cruces, las de Monte Alto, Monte Bajo y Tepoztatlán-Tezontlalpan. El segundo, el de Cuautla, escurría por el sector oriental de la Cuenca y era alimentado por las aguas que descendían de la Sierra Nevada; ambos eran afluentes del río Amacuzac y de esta manera quedaban integrados a la cuenca del Río Balsas, que posteriormente desemboca en el Océano Pacífico (Figura 2).

Como resultado de una intensa actividad volcánica se originó la Sierra del Chichinautzin en el Cuaternario superior; esta estructura cerró por el sur el antiguo valle de México; a partir de ese momento se convirtió en una cuenca cerrada o endorreica. Este nuevo conjunto montañoso interrumpió el drenaje existente y favoreció la existencia de lagos.

En la Cuenca de México primero se formó un gran lago, cuya extensión ha variado con el tiempo; posteriormente fue segmentado en varios lagos que estuvieron sometidos a frecuentes variaciones de nivel; los actuales son remanentes de otros que eran más antiguos y extensos; algunos de ellos han sufrido una enorme

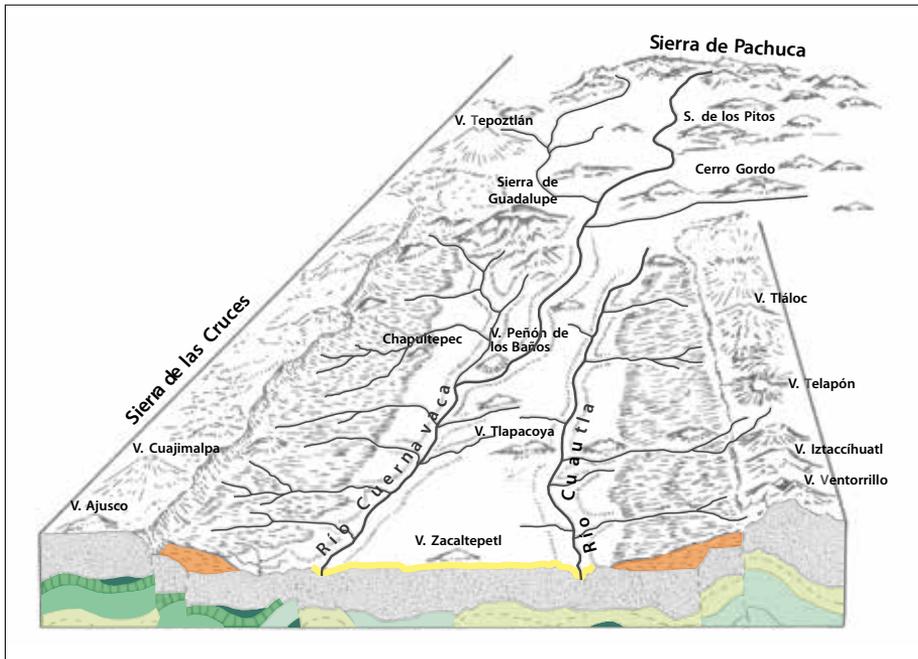


Figura 2. El valle de México en el Plio-Pleistoceno (de acuerdo con Mooser, 1975).

reducción y otros, a lo largo del tiempo, han desaparecido (Figura 3). Según Tricart (1985:14):

Los lagos están sometidos a variaciones de nivel más o menos frecuentes, más o menos importantes, expresión del balance hidrológico de la cuenca lacustre, el cual registra los cambios ambientales. Los lagos también son un receptáculo de todo lo que les llega desde la atmósfera y por medio de los cauces de agua que en ellos desembocan. No sólo se sedimentan las partículas sólidas, sino también las sales disueltas en el suelo y en la atmósfera. Su concentración varía de acuerdo con el balance hidrológico lo que provoca cambios en el ambiente ecológico...

Época prehispánica

En la época prehispánica las áreas de la Cuenca de mayor importancia para el desarrollo urbano fueron aquéllas donde se establecieron los primeros y más importantes asentamientos humanos: Cuicuilco y Tenochtitlan en la planicie lacustre, que como se ha mencionado, corresponde a la porción más baja de la Cuenca, y Teotihuacan en el noreste, en la planicie proluvial-lacustre.

Los primeros grupos indígenas se establecieron en las planicies arriba mencionadas, cerca o en la orilla de los lagos que existían en la Cuenca, debido a que éstos les proporcionaban agua, elemento indispensable para la vida del hombre, así como plantas y animales, que eran la base de su alimentación (aves migratorias, peces, anfibios, reptiles, insectos, algas, tules y gramíneas; Manzanilla y Serra, 1987:16), además de contar con un buen medio de transporte; del aprovechamiento directo de los recursos naturales disponibles dependía el bienestar de la población.

No se pueden negar los efectos que causaron sobre el ambiente de la Cuenca, las diferentes civilizaciones que han habitado en ella. El deterioro del medio en general y de la zona lacustre, en particular, inició en la época prehispánica con la tala de los bosques que se encontraban en las montañas, sobre todo en las laderas bajas, cercanas a los poblados en donde de manera paulatina fueron apareciendo áreas de difícil regeneración forestal, debido a un incremento de la erosión; la explotación de este recurso se realizó para obtener madera de, entre otros, pino, oyamel, fresno y encino, que sirvieron para apoyar las grandes construcciones que se realizaron en las ciudades prehispánicas y para uso doméstico.

Esta afirmación se basa en fuentes de procedencia indígena, como los códices, o libros de pinturas, de origen prehispánico o elaboradas con el mismo méto-

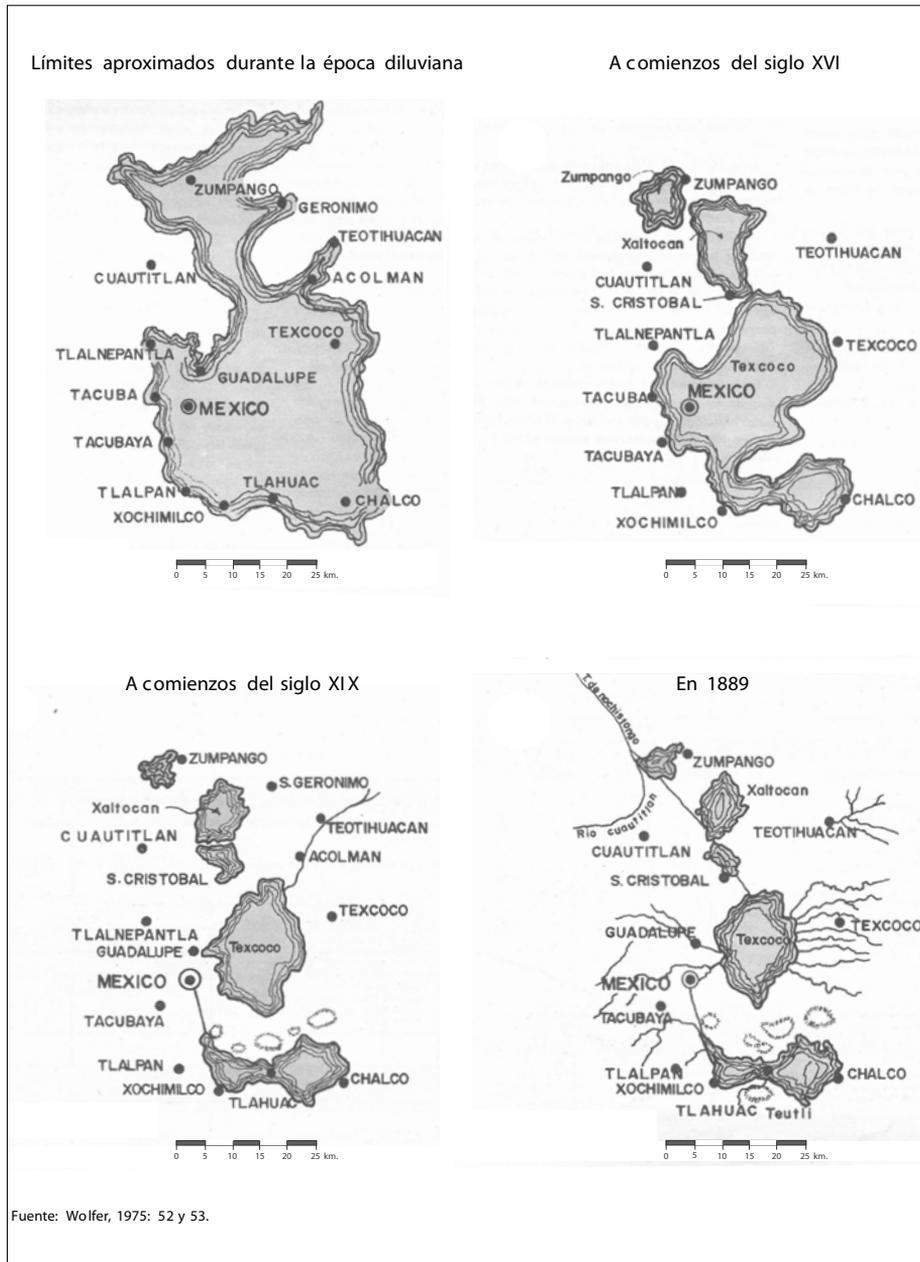


Figura 3. Evolución de los lagos de la Cuenca de México.

do de los indígenas en los años inmediatamente posteriores a la conquista, como: el Códice Mendocino y la Matrícula de Tributos; dentro de estas fuentes se ofrecen datos sobre lo que aquí nos interesa para comprobar nuestra afirmación. En el Códice Mendocino se describen los tributos que los pueblos sojuzgados tenían que pagar al gobierno de México Tenochtitlan (Molíns, 1954:318); se señala: que el pueblo de Quahuacan tenía que pagar anualmente 10 025 cargas de leña, 6 267 tablones grandes, 5 475 vigas grandes. Más adelante comenta:

Se hace difícil creer que a Tenochtitlan le bastara con esta sola tributación de leña y madera de Quahuacan. Tenemos que suponer que los pueblos alrededor del valle debieron subvenir a las necesidades de la ciudad en proporciones probablemente mayores.

La Matrícula de Tributos contiene una serie de pinturas que muestran las tributaciones que imponían a los pueblos sometidos los integrantes de la Triple Alianza: Tenochtitlan, Texcoco y Tlacopan (Castillo, 1991); los tributos debían ser entregados en tiempos determinados y la recaudación periódica permitía financiar los gastos de guerra, servicios y la construcción. El tributo era parte esencial del sistema económico prehispánico y servía para el embellecimiento de la ciudad: construcción de templos, palacios, calzadas y puentes (Sepúlveda, 1991:138). Entre los productos que se mencionan se encuentran: leña, tablones de madera, morillos, vigas labradas para construcción, parihuelas, petacas y otros muebles, además de papel amate; señala también que los productos forestales se impusieron a las provincias cercanas a Tenochtitlan (*Ibid.*:137).

Otras fuentes que también permiten conocer este problema son los relatos de los cronistas españoles, como Bernal Díaz del Castillo, que quedaron maravillados al observar, en los mercados de Tenochtitlan y Tlaltelolco, primero una gran multitud de personas que ahí se encontraban y, segundo, la enorme cantidad y variedad de mercancías que se ofrecían; de los que hace una descripción pormenorizada, aquí sólo se mencionarán los que interesan en este trabajo, los procedentes de la tala de bosques: “Pues los que vendían madera, tablas, cunas y vigas y tajos y bancos, todo por si. Vamos a los que vendían leña, ocote y otras cosas de esta manera” (citado en León Portilla, 1983:392).

Otra descripción de lo que los conquistadores españoles encontraron en los mercados la ofrece Fray Toribio de Benavente, conocido como Motolinia, quien relató lo que observó en el mercado de Tenochtitlan: “Véndese en estos mercados madera, las vigas por si y cerca la tablazón y las latas y a su parte leña” (*Ibid.*:396).

Una descripción más la debemos a Fray Diego de Durán, en la que hace referencia al tema que nos ocupa:

De otras partes tributaban leña, cortezas de árboles, que es leña de señores, por la hermosa brasa que hace, y también tributaban gran cantidad de carbón y esto tributaban todos los pueblos que tenían montes. Otros pueblos tributaban piedra, cal, madera y tablas y vigas para edificar sus casas y templos (*Ibid.*:402).

La información que ofrece Katz (1983:464) también permite apreciar una de las razones del deterioro de la Cuenca, quien al referirse a los medios de transporte en los lagos de la Cuenca de México, en la época prehispánica, señala “Millares de canoas hacían posible una verdadera comunicación entre las ciudades del valle, facilitando el desarrollo del comercio y de la economía”.

El historiador Gurría Lacroix (1978:22) hace un comentario al respecto, al señalar que la comunicación entre las ciudades de México-Tenochtitlan y Texcoco se hacía por medio de canoas “... las que, según cronistas e historiadores, pasaban de doscientas mil. Se utilizaban para transportar gente y abastecer a la ciudad, como cincuenta mil”.

Con estos pocos ejemplos se puede inferir la importancia que tenían los productos derivados de los bosques para la economía de las grandes ciudades prehispánicas y del pueblo en general que habitaba la Cuenca de México. Es fácil imaginar lo que esto significó para la destrucción de los bosques del área.

La explotación exhaustiva de los bosques que rodeaban la Cuenca de México, que se inició en la época prehispánica, siguió en la colonial y ha continuado hasta la actualidad; se puede considerar como una acción indirecta que favoreció la desecación paulatina de los lagos, pero además existieron acciones directas en la época prehispánica, colonial y actual, que han precipitado en muy corto tiempo la desecación de los lagos de la Cuenca.

Un ejemplo de acción directa que favoreció, en parte, la desecación del lago de Texcoco fue la acontecida poco tiempo después de fundada Tenochtitlan, en 1325; con motivo de su crecimiento poblacional sus gobernantes tuvieron que realizar obras para aumentar la superficie habitable, debido a que la isla era pequeña para una ciudad como Tenochtitlan, que se encontraba en pleno auge con una población en constante crecimiento demográfico, nos referimos al aumento del espacio logrado a través de la construcción de chinampas para ganar terreno al lago; ese fue el primer paso que dio como resultado la reducción de la superficie del lago de Texcoco. El sistema de chinampas perdura hasta nuestros días,

consiste en transportar tierra que es vertida en capas sobre una base formada por raíces, ramas y estacas que fijan la parcela al fondo del lago.

Para entender el proceso de las inundaciones que afectaron tanto a la ciudad prehispánica como a la colonial, se deben conocer las diferentes altitudes en que se encontraban los lagos de la Cuenca a principios del siglo XVI, según Mooser (1975) eran cinco los principales lagos, citados de norte a sur: Zumpango, Xaltocan, San Cristóbal, Texcoco, Xochimilco y Chalco. El más alto de todos era el de Zumpango, le seguía el de San Cristóbal y el de Xaltocan hasta llegar al de Texcoco que era el más bajo, localizado en el fondo de la Cuenca; hacia el sur los lagos volvían a situarse a mayor altura que este último; el más alto era el de Xochimilco y le seguía el de Chalco (Tabla 1); al respecto, Gurría Lacroix (1978:18) proporciona los datos de la altura de los lagos de la Cuenca, del año 1864, tomados de Orozco y Berra (1864:110), calculados en varas y señala que a pesar de adolecer de alguna inexactitud las proporciones subsisten:

En la época de fuertes lluvias de verano el agua bajaba del norte, de Zumpango a Xaltocan y San Cristóbal, hasta desembocar en el lago de Texcoco, que era de agua salada; el mismo proceso se daba en la parte sur de la Cuenca, en donde las aguas bajaban del lago más alto, que era Xochimilco, y pasaban al lago de Texcoco (Figura 4). Cabe señalar que no existía comunicación continua entre el lago de Chalco y el de Texcoco, debido a la presencia de la sierra de Santa Catarina, que impedía que las aguas del lago de Chalco llegaran directamente al de Texcoco. Los lagos del sur nunca representaron un peligro para la Ciudad de México.

Tabla 1. Altura relativa de los lagos de la Cuenca de México en la época colonial

Lagos	Varas	Metros*
Zumpango	6.062	5.07
Xaltocan	3.474	2.90
San Cristóbal	3.597	3.01
Texcoco	0.000	0.00
Ciudad de México	1.907	1.59
Xochimilco	3.119	2.61
Chalco	3.082	2.58

Nota:* Cálculos de los autores.

Fuente: Orozco y Berra (1864:110).



Figura 4. Antiguo funcionamiento hidrológico de la Cuenca de México.

En la época prehispánica, para contener las avenidas que afectaban a México-Tenochtitlan, se construyó en la parte oriental de la ciudad el albarradón de Netzahualcóyotl, que separó al lago de Texcoco del de México; este último se encontraba más alto que el anterior; por el suroeste el dique de Mexicaltzingo que separaba las aguas del lago de México de las del lago de Xochimilco. En el sur los lagos de Xochimilco y Chalco estaban separados por medio del dique de Cuitláhuac, el cual abrían o cerraban dependiendo de la cantidad de agua que se necesitaba.

La Ciudad de México-Tenochtitlan sufrió una fuerte inundación en 1449, por lo que su gobernante, en aquel entonces Moctezuma Ilhuicamina, pidió ayuda al gobernante de Texcoco, Netzahualcóyotl, quien para solucionar el problema propuso la construcción de un albarradón en la parte oriental de la ciudad; esa fue una obra de ingeniería increíble que dirigió Netzahuacóyotl, por lo que llevó su nombre.

Al respecto vale la pena señalar lo que comentó Gurría Lacroix (1978:24):

A partir del albarradón de Netzahualcóyotl, la laguna se dividió en dos partes, una que conservó el nombre de Tetzco, al este y la otra que recibió el nombre de laguna de México, por encontrarse en ella dicha ciudad. Poco a poco esta separación hizo que el lago de Tetzco fuera de agua salada y la de México de agua dulce pues en ella desaguaban los lagos de Xochimilco y Chalco, que estaban alimentados como ya quedo dicho por inúmeros de manantiales de agua dulce y cristalina.

Época colonial

Durante la conquista y a todo lo largo de la época colonial, la explotación de los bosques continuó, pues se necesitó mucha madera para la edificación de grandes construcciones como fueron las enormes iglesias, los conventos, las mansiones y los carruajes de los personajes importantes, y para combustible y uso doméstico de la creciente población.

En esa época los cambios del medio ambiente continuaron acentuándose; las acequias de la época prehispánica que aún perduraban fueron cegadas para aumentar la superficie de la ciudad y por tanto el lago se fue reduciendo.

Entre las principales causas por las cuales se inundaba la Ciudad de México, señalamos la presencia de los dos ríos más caudalosos de la Cuenca y, por tanto, enemigos de la Ciudad de México, el de Cuautitlán, que baja de la vertiente este

de la Sierra de Monte Bajo y el río de las Avenidas de Pachuca, que baja de la vertiente sur de la sierra del mismo nombre. Ambos desaguaban en el lago de Zumpango que, al aumentar sus aguas, las vertía en los lagos de Xaltocan-San Cristóbal y este último derramaba en el de Texcoco; son estos ríos en general los que producían las mayores inundaciones de la Ciudad de México (*Ibid.*:16; Figura 4).

A pesar de que los lagos se iban secando, en verano, en la época de muchas lluvias, la ciudad se inundaba, por lo que los gobernantes de entonces se vieron obligados a construir un albarradón que llamaron de San Lázaro, en el lado oriental de la ciudad, que corría de norte a sur formando un semicírculo (Figura 5); sirvió para sustituir al de Netzahualcóyotl, construido en la época prehispánica, el cual había sido destruido por los conquistadores para que pasaran los bergantines que permitieron asediar la ciudad y dominarla. Los restos del albarradón prehispánico sirvieron en gran parte para construir la ciudad de la Nueva España. Como las inundaciones continuaban se tuvieron que construir algunos diques más de contención, que tampoco terminaron con el problema. Finalmen-



Figura 5. Plano de la Ciudad de México en 1688, de Juan Gómez de Trasmonte. Vista desde los lomeríos del poniente. Al fondo se observa el albarradón de San Lázaro (Foto: Raúl MacGregor).

te Enrico Martínez decidió realizar, en el siglo XVII, una gran obra de ingeniería que terminó en 1608 y puede calificarse como la causante de la primera gran transformación del medio ambiente de la Cuenca realizada por acción antrópica, la que consistió en abrir por el lado noroeste de ésta, un túnel para desaguar las aguas del río Cuautitlán, aquél se derrumbó al año siguiente de su apertura, por lo que tuvieron que realizar obras para convertirlo en un tajo abierto, conocido como Tajo de Nochistongo, que convirtió la Cuenca de México en exorreica.

A pesar de las obras anteriores, en el año 1629, a causa de grandes aguaceros se inundó la Ciudad de México, a tal grado que durante algún tiempo tuvieron que transportarse en canoas; el número de muertos fue enorme, la inundación duró cinco años (Benítez, 1984:48).

Debido a que estas acciones no fueron suficientes para acabar con las inundaciones de la ciudad, ya que se prolongaron hasta fines del siglo XIX, decidieron realizar otras obras para sacar las aguas del lago de Texcoco y del drenaje de la ciudad fuera de la Cuenca por gravedad. Para ello se construyó el gran canal del desagüe y el túnel de Tequixquiac, que se terminaron en 1900, lo que aceleró la desaparición de los lagos de la planicie lacustre.

Por otra parte, se debe mencionar el hundimiento gradual en algunas partes de la Ciudad de México, localizadas en la planicie lacustre como consecuencia de la extracción de agua del subsuelo, lo cual ha favorecido la compactación de las capas de arcilla; según Zamorano y González (1999:300) el hundimiento entre 1881 y 1970 fue de 6.26 m; para fechas posteriores se señala que hubo épocas en las que el hundimiento registrado en la Ciudad de México fue más notorio; de 1948 a 1951 el hundimiento registrado fue de 45 cm por año y entre 1952 y 1992 fue de 17.5 cm por año (Marsal, 1992 citado en Lugo *et al.*, 2001:417).

Infortunadamente, para 1965, el hundimiento del subsuelo de la Ciudad de México, como consecuencia de la extracción en exceso de agua de la recarga natural, logró que la ciudad quedara por abajo del nivel del lago de Texcoco, lo que era no sólo un factor de peligro para las inundaciones, sino también el gran canal del desagüe quedó por debajo de ese nivel, por lo que era necesario bombear las aguas negras para sacarlas y vaciarlas en el túnel de Tequixquiac (Figura 6). Debido a esto se pensó en una solución más efectiva, aunque costosa, para sacar las aguas de la Cuenca, fue la realización del sistema de drenaje profundo, que se inauguró en 1975; el cual consta de dos interceptores, el central, de 8 km de longitud y el oriente, de 10 km; ambos confluyen a un enorme emisor de 50 km de longitud; sumando toda la red, el túnel alcanza 68 km de longitud. El diámetro interior es de 5 m, su capacidad máxima es de 100 m³ por segundo y su profundidad varía entre 30 y 50 m (Ochoa y Solano, 1975:223). Estas últimas obras

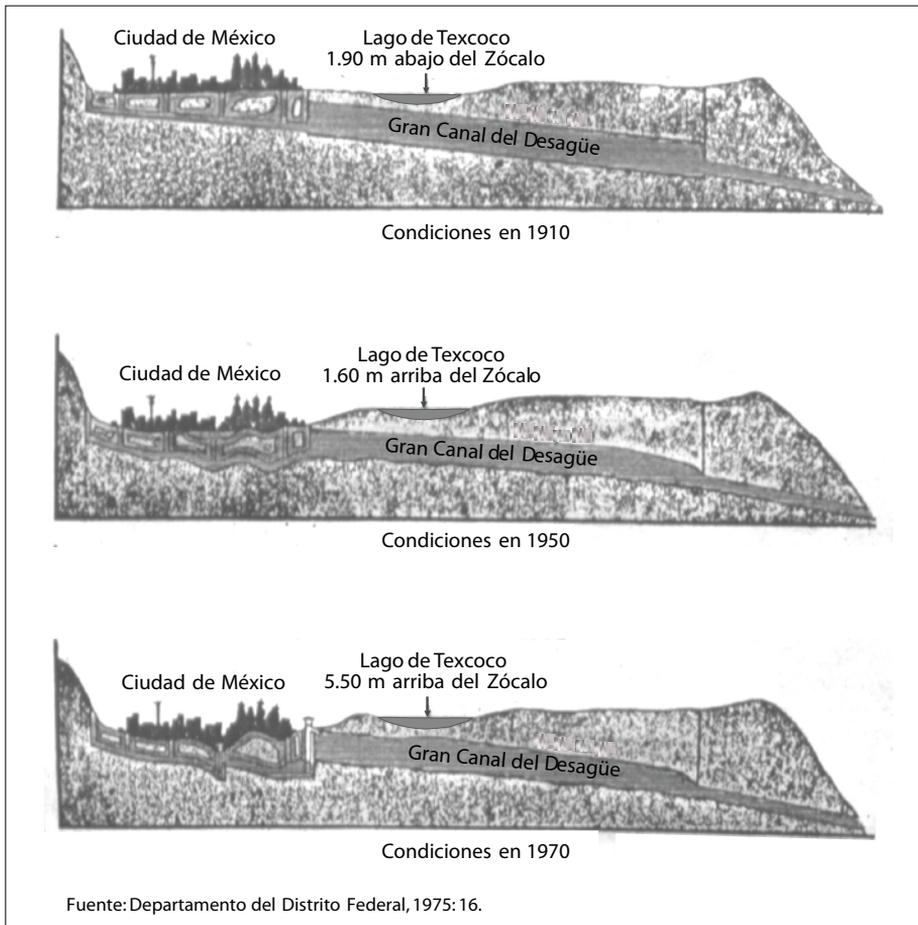


Figura 6. Hundimiento de la Ciudad de México, 1900-1970.

del siglo XX han provocado los mayores desequilibrios ecológicos inducidos por la acción humana en la Cuenca de México.

Viene al caso lo dicho por el geógrafo francés George (1985:48):

Voluntaria o involuntariamente, la acción humana es capaz de provocar mutaciones, de alterar ritmos anteriores y de desencadenar nuevos sistemas de relaciones físicas, sin ser nunca capaz en lo inmediato, de dominarlos y neutralizar sus peligros.

Crecimiento espacial de la Ciudad de México

Para conocer el proceso de crecimiento urbano de la Ciudad de México, desde su origen hasta la actualidad, se elaboraron cinco mapas a la misma escala que muestran, de manera clara y precisa, hacia donde se dirigió el crecimiento espacial de la ciudad en siete momentos, considerados como los más significativos a lo largo de su historia, y relacionarlos con las principales unidades del relieve de la Cuenca que son afectadas por este crecimiento. Los años seleccionados son: 1524, cuando se inicia el dominio colonial, 1900, la época independiente; 1930, inicia el proceso de industrialización, 1960, época en que presenta un fuerte desarrollo económico y social como consecuencia del desarrollo de la industrialización bajo el esquema de la sustitución de importaciones; 1990 se caracterizó por el derrumbe del modelo de desarrollo antes mencionado y, al mismo tiempo, se estructuró un modelo de corte neoliberal, basado en la apertura del país al mercado mundial y a la reducción de la participación del Estado en la economía nacional (Garza, 2005:89); y el año 2000, inicio del nuevo milenio (Figura 7).

El crecimiento espacial se llevó a cabo en tres formas: por una expansión rápida de su periferia a lo largo de las principales vías de comunicación, por ir incorporando otras localidades vecinas más pequeñas y por un crecimiento vertical; este último ha sido, quizá, el menos importante, por las condiciones del subsuelo, por lo que la Ciudad de México, en general, resulta muy extendida y baja (Gutiérrez, 1995:388).

Las necesidades de espacio para el desarrollo urbano en la actualidad han llegado a tal grado, que áreas consideradas antiguamente como barreras naturales, al ser invadidas por el proceso de urbanización, han dejado de ser un obstáculo. Infortunadamente, en muchos casos, la urbanización se desarrolla en espa-

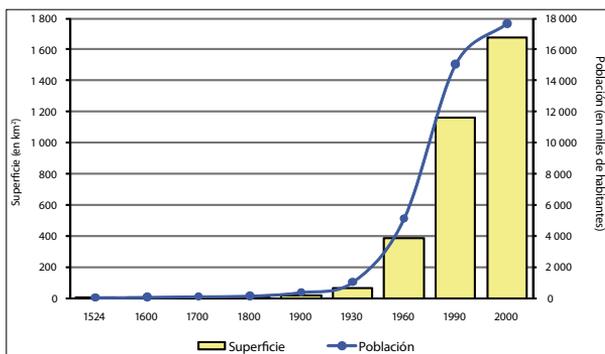


Figura 7. Crecimiento espacial y demográfico de la Ciudad de México, 1524-2000.

cios considerados como peligrosos, por ser lugares con pendientes inestables que pueden ser afectados con desplomes o deslizamientos de tierras o lugares en zonas muy bajas susceptibles de ser inundadas.

Se deben mencionar las siete principales barreras naturales de la Cuenca que por varios siglos impidieron el crecimiento espacial de la Ciudad de México: al norte, la Sierra de Guadalupe, al sur la Sierra de Santa Catarina, y más al sur las sierras del Ajusco y Chichinautzin, al este el lago de Texcoco y, finalmente, al oeste la zona montañosa de las sierras de las Cruces y Monte Alto.

Las áreas montañosas de la Cuenca han sido deforestadas desde hace muchísimos años, al respecto Beltrán (1963:336-337), preocupado por este problema, proponía dedicar las mayores extensiones posibles a parques nacionales y a la obtención de los medios económicos para su vigilancia y protección, consiguiendo al mismo tiempo contar con lugares para la recreación en beneficio de los habitantes de la Cuenca.

Viene al caso recordar que el general Lázaro Cárdenas, también preocupado por la deforestación de la Cuenca, creó el Parque Nacional Cumbre del Ajusco en 1936, como una reserva forestal (Melo, 2002:34). Seguramente tanto Cárdenas como Beltrán presagiaron la inminente invasión de la urbanización sobre las áreas forestales de la Cuenca.

Periodos seleccionados del crecimiento espacial

El año 1524 corresponde al establecimiento, en la época colonial, de la Ciudad de México edificada sobre las ruinas de Tenochtitlan; es a partir de esa fecha cuando se tienen datos de que la entonces Ciudad de México ocupaba una superficie de 1.9 km², con una población de 30 mil habitantes. Su crecimiento espacial continuó hasta llegar al año 1900, en la que presentó un área compacta formada alrededor del núcleo central, aunque ya mostraba un pequeño alargamiento en su porción occidental, a lo largo de la Calzada México-Tacuba. En ese año la ciudad registró 368 mil habitantes que ocupaban una superficie de 16.9 km², superficie que se encontraba rodeada por un gran espacio rural. Como se observa en la Figura 8, de 1524 hasta 1900, la Ciudad de México se encontraba asentada únicamente en la planicie lacustre.

En 1930, cuando se inició la industrialización, la Ciudad de México contaba con un millón de habitantes y alcanzó 66.8 km² de superficie, cuatro veces mayor a la del periodo anterior; su aspecto de núcleo compacto se fue perdiendo debido a que, en ese año, los principales crecimientos espaciales presentaron pro-

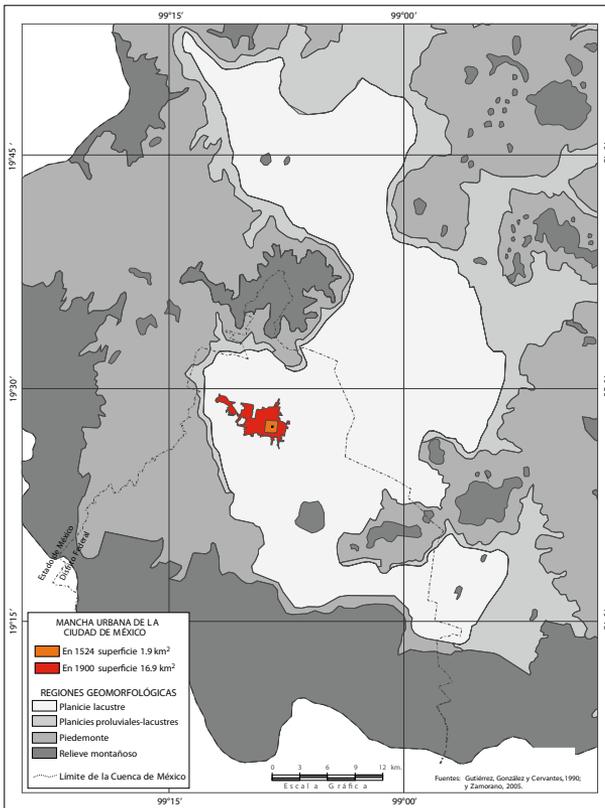


Figura 8. Área urbana de la Ciudad de México en 1524 y 1900 y principales regiones geomorfológicas de la Cuenca de México.

longaciones alargadas hacia las áreas rurales en forma de cuatro pequeños tentáculos, dos al norte y dos al sur, a lo largo de las principales vías de comunicación: hacia el noreste, el crecimiento se dio a lo largo de la avenida Insurgentes Norte; en el noroeste, el alargamiento se dirigió hacia las avenidas Aquiles Serdán y Parque Vía; el del sureste se extendió a lo largo de la Calzada de Tlalpan y el del suroeste a lo largo de la avenida Insurgentes Sur, uniéndose ambos en el extremo suroeste (Figura 9). En 1930, la ciudad presentó una forma muy irregular, los tentáculos del noroeste y sureste se extendieron sobre la planicie lacustre, no así los del noreste y suroeste; el del noreste en su extensión, alcanzó la planicie proluvial-lacustre; el del suroeste rebasó la planicie proluvial-lacustre y se adentró, de manera franca, en el piedemonte. Se debe aclarar que hasta 1930 las barreras mencionadas que impedían el crecimiento espacial de la Ciudad de México no habían sido rebasadas.

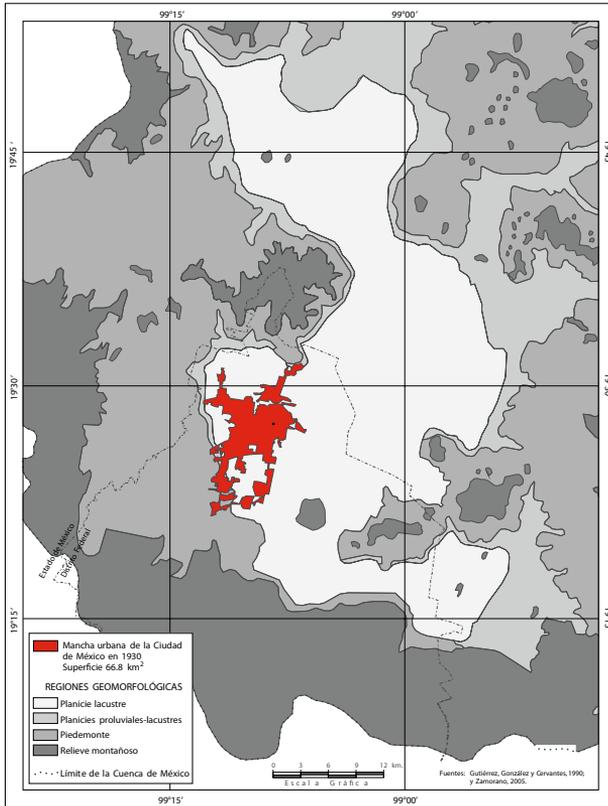


Figura 9. Área urbana de la Ciudad de México en 1930 y principales regiones geomorfológicas de la Cuenca de México.

El crecimiento espacial más rápido de la Ciudad de México se registró entre 1930 y 1960 cuando su superficie casi se sextuplicó en tan solo 30 años, al pasar de 66.8 km² a 383.8 km² y su población llegó a 5.1 millones de habitantes (Figura 10). En 1960 los espacios vacíos del mapa anterior se urbanizaron y formaron una superficie más compacta; la periferia siguió creciendo en forma tentacular, los tentáculos más sobresalientes fueron los de la parte noreste, que se urbanizó a lo largo de la carretera a Pachuca, en la parte más baja de la Cuenca, o sea en la planicie lacustre, y el del extremo noroeste que se dirigió a lo largo de la carretera en dirección a Querétaro; la mayor parte se extendió sobre el piedemonte pero su extremo final alcanzó parte del relieve montañoso de la sierra de Guadalupe. Un tentáculo central, más pequeño, también subió sobre la sierra anterior; de los dos tentáculos que se formaron en el sur, el del sureste presentó una forma muy irregular; se extendió a lo largo de la carretera a Cuernavaca, subió sobre el

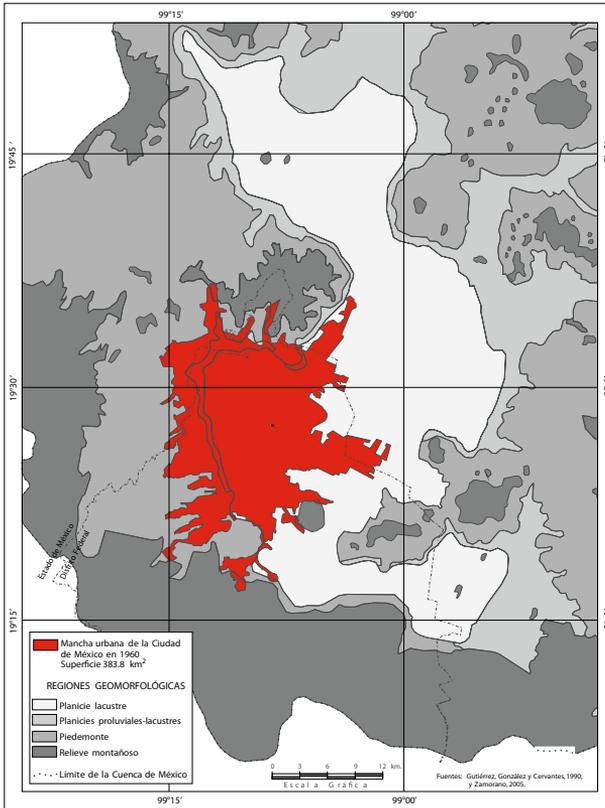


Figura 10. Área urbana de la Ciudad de México en 1960 y principales regiones geomorfológicas de la Cuenca de México.

pedemonte hasta alcanzar al relieve montañoso de la sierra de Chichinautzin; el del suroeste sólo alcanzó el pedemonte. El tentáculo que se formó en el centro oriente de la ciudad, es el más grueso y más sobresaliente; se desplazó a lo largo de la carretera a Puebla, recorriendo la parte más baja de la Cuenca, sobre terreno de lo que antes ocupaba el lago de Texcoco; también se observó por el suroriente una pequeña prolongación, que alcanzó y rodeó partes bajas del Cerro de la Estrella.

Por la parte occidental, el crecimiento espacial de la ciudad fue más compacto, creció mucho ocupando gran parte del pedemonte, que se asocia a las sierras que originaron su formación, o sea las de las Cruces y Monte Alto.

En 1990, con una población que rebasó los 15 millones de habitantes, la mancha urbana se extendió de forma espectacular hacia todos los puntos cardinales, rebasando cuatro de las siete barreras naturales que dificultaban la expansión urbana. Su superficie alcanzó 1 160 km², lo que significó que en treinta años triplicó

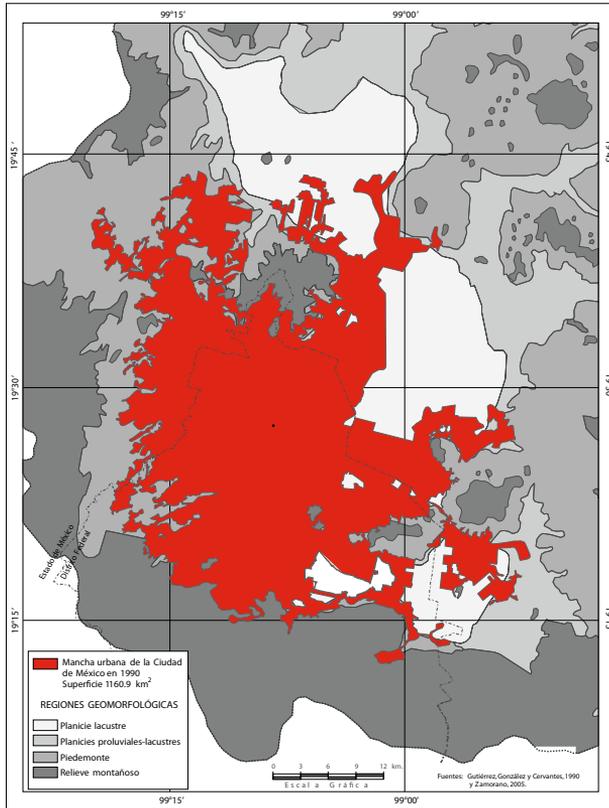


Figura 11. Área urbana de la Ciudad de México en 1990 y principales regiones geomorfológicas de la Cuenca de México.

su superficie (Figura 11). El crecimiento en la parte norte continuó dándose en forma de enormes tentáculos de apariencia sumamente irregular, que presentan la misma orientación que en 1960, el del noreste continuó hacia la ciudad de Pachuca; el del noroeste siguió en dirección hacia la ciudad de Querétaro; ambos tentáculos rodearon prácticamente toda la sierra de Guadalupe, afectando más la parte sur por la que ascendieron hasta la zona montañosa. Un proceso semejante se presentó en el sureste de la ciudad, aunque su crecimiento fue mayor y más compacto, gran parte se dio en la planicie lacustre y otra parte en la sierra de Santa Catarina, que se vio invadida, por su porción norte, alcanzando en pequeños lugares su zona montañosa; cruzó por la parte media de la sierra y ahí se originó un tentáculo que la cruzó y se adentró en la parte de los terrenos de los antiguos lagos de Chalco y Xochimilco; más al sur, la urbanización ascendió, ya de manera franca, sobre las partes más bajas de la zona montañosa de las antiguas barreras de las sierras del

Ajusco y del Chichinautzin. El crecimiento espacial en la porción occidental de la ciudad se dio de forma diferente; aunque la superficie urbanizada aumentó enormemente, se quedó en el piedemonte sin alcanzar la barrera montañosa.

En el 2000, al principio del siglo XXI, se observó una enorme mancha urbana compacta, con un espacio central definido por su alta densidad de edificación; la mancha se extendió por toda la región suroeste de la Cuenca de México. Su superficie abarcó 1 675 km², lo que significó, que en tan solo diez años, aumentó una y media veces su tamaño; su población superó los 18 millones (Figura 12).

Se observó que en el 2000, en su proceso de crecimiento espacial, la urbanización en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) rebasó las siete barreras naturales mencionadas anteriormente:

Al norte, la Sierra de Guadalupe quedó prácticamente invadida por el crecimiento urbano.

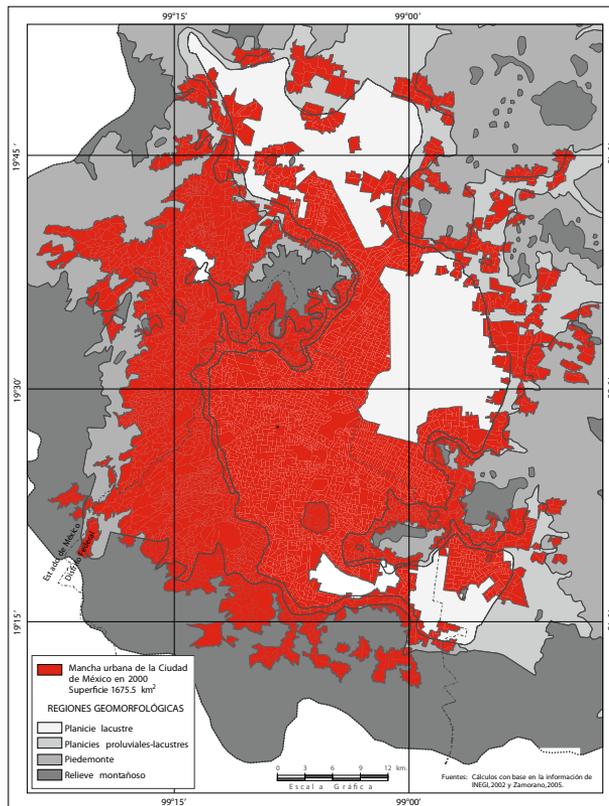


Figura 12. Área urbana de la Ciudad de México en 2000 y principales regiones geomorfológicas de la Cuenca de México.

Al sur, la Sierra de Santa Catarina se encuentra rodeada por la urbanización. Más al sur, en las sierras del Ajusco y Chichinautzin, la urbanización se adentra en la zona montañosa.

Al occidente, en la zona montañosa de las sierras de Monte Alto y de las Cruces, el crecimiento de la ciudad se adentra en el piedemonte; además, tanto en el extremo norte y como en el sur, se formaron dos tentáculos que alcanzaron la zona montañosa.

La planicie lacustre fue atravesada de occidente a oriente por un tentáculo que procede de la estribación noreste de la Sierra de Guadalupe que se bifurca: el brazo norte sube por el piedemonte de la Sierra de Chiconautla, el del sur por el piedemonte de la Sierra de Patlachique.

Se debe señalar que lo más notable del 2000 fue la aceleración y la transformación del proceso de urbanización de la periferia de la ZMCM, cuando el patrón de crecimiento, basado en manchones urbanos aislados, se hizo más notorio y predominante que el crecimiento a base de tentáculos; al respecto González (1987:446) afirma: “La importancia y originalidad del espacio periurbano estriba en ser el exponente más expresivo de los cambios territoriales en virtud de su proximidad a la ciudad”. Las principales áreas de la periferia, donde se presentaron las primeras formas de crecimiento, fueron: la norte, este y sur, las cuales se encontraban separadas de la gran mancha urbana y prácticamente, desconectadas del núcleo principal; la mayor parte de ellas se localizó en la orilla oriental de lo que constituía la planicie lacustre del enorme lago de la época diluviana, manchones que se adentran en la planicie proluvial-lacustre (Figuras 1 y 3).

En general, se puede decir que la población con altos recursos económicos construye zonas residenciales en el piedemonte y en las zonas montañosas; pero también en las barrancas; en condiciones desfavorables y de alto riesgo se establecen grupos marginados. La urbanización de estas áreas resulta sumamente costosa para el país.

Se puede concluir que en el 2000, el crecimiento espacial urbano de la ZMCM es caótico y desorganizado, y por tanto alarmante, con lo que se comprueba que el ordenamiento urbano que han propuesto las autoridades no ha funcionado, por lo que su crecimiento resulta impresionante e inaceptable y debe considerarse como un grave atentado a la seguridad del medio ambiente, que ha sufrido cambios drásticos por la presencia humana, sin que se tomen medidas efectivas para reducir su impacto.

No se puede hablar del crecimiento espacial sin relacionarlo con el aumento demográfico y los problemas que este crecimiento origina. Si pensamos en las necesidades de agua y suelo para el abastecimiento de la población de toda la Cuen-

ca y no sólo de la ZMCM, se observa que ésta ha ido aumentando a lo largo del siglo XX en proporciones gigantescas, debido a un crecimiento demográfico muy acelerado. La población total de la Cuenca era, a principios del siglo XX, de 916 mil habitantes, no llegaba ni siquiera al millón; a finales del mismo alcanzó más de 18.7 millones. Este aumento desorbitado de la población es una de las principales causas de las enormes necesidades de agua para su abastecimiento, por lo que cada día resulta más costoso asegurar su distribución de manera equitativa.

Pero ¿qué va a suceder en el espacio de la Cuenca?, particularmente en aquél donde se presenta una rivalidad entre el uso del suelo rural y urbano, en el que las actividades urbanas están ganando la partida. Esta aseveración se comprueba al señalar que en 1900 la población urbana era de 422 mil habitantes equivalentes al 46.1% de la población total; la población rural era de 494 mil habitantes equivalentes al 53.9%. Para el 2000 predominaba la población urbana alcanzando la cifra de 18.2 millones de habitantes que representaban el 97.5% mientras que la rural sólo llegaba a 477 mil habitantes, equivalente al 2.5% (Gutiérrez *et al.*, 2005:72).

La Ciudad de México está ligada al resto del país por numerosas vías de comunicación, como ya se ha señalado, a lo largo de ellas y en especial de las más importantes se empieza a desplazar con mayor rapidez el área urbanizada. Todas las vías de comunicación han logrado darle a la ciudad la configuración que presenta en la actualidad.

Finalmente, para dar una idea muy general de lo que significa su crecimiento espacial, se puede señalar, tomando como referencia el zócalo de la Ciudad de México, que en 1524 la ciudad se extendía en un radio aproximado de un kilómetro que podía recorrerse fácilmente a pie; para el 2000, ese radio alcanza más de 30 km por el norte y más de 20 km por el sur.

Referencias

- Beltrán, E. (1963), "Los problemas del valle de México", en *Mesas redondas sobre problemas del valle de México*, Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables, México, pp. 341-370.
- Benítez, F. (1984), *Historia de la Ciudad de México*, tomo 9, Salvat, Barcelona.
- Castillo Farreras, V. M. (1991), *La Matrícula de Tributos. Nuevos estudios*, Instituto de Investigaciones Históricas, UNAM y Secretaría de Hacienda y Crédito Público, México.

- DDF (1975), *Sistema de Drenaje Profundo. Sumario*, Departamento del Distrito Federal, México.
- Garza, G. (2005), *La urbanización de México en el siglo XX*, El Colegio de México, México.
- George, P. (1985), *El medio ambiente*, Orbis, España.
- González Urruela, E. (1987), “La evolución de los estudios sobre áreas periurbanas”, *Anales de Geografía de la Universidad Complutense de Madrid*, núm. 7, pp. 439-448.
- Gurría Lacroix, J. (1978), *El desagüe del valle de México durante la época novohispana*, Instituto de Investigaciones Históricas, UNAM, México.
- Gutiérrez de MacGregor, M. T., J. González y E. Cervantes (1990), “Crecimiento espacial de las principales ciudades de México”, *Atlas Nacional de México*, vol. I, cap. III, núm. 3.5, escala. 1:100 000, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Gutiérrez de MacGregor, M. T. (1995), “La Ciudad de México y la transformación del medio ambiente”, *Anales de Geografía de la Universidad Complutense de Madrid*, núm. 15, pp. 383-391.
- Gutiérrez de MacGregor, M. T., J. González Sánchez y J. J. Zamorano Orozco (2005), *La Cuenca de México y sus cambios demográfico-espaciales*, Temas Selectos de Geografía de México (I.8.1), Instituto de Geografía, UNAM, México.
- INEGI (2002), *XII Censo General de Población y Vivienda 2000*, Instituto Nacional de Estadística e Informática, México.
- Katz, F. (1983), “Situación social y económica de los aztecas durante los siglos XV y XVI”, en León Portilla, M. (ed.), *De Teotihuacan a los Aztecas. Antología de fuentes e interpretaciones históricas*, 2ª ed., UNAM, México.
- León Portilla, M. (1983), *De Teotihuacan a los Aztecas. Antología de fuentes e interpretaciones históricas*, 2ª ed., UNAM, México.
- Lugo Hubp, J., J. J. Zamorano Orozco y A. García Romero (2001), “Direct and indirect anthropogenic modifications in the basin of Mexico”, in Bobrowsky, P. T. (ed.), *Geoenvironmental mapping: method, theory and practice*, A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 411-427.
- Manzanilla, L. y M. C. Serra (1987), “Aprovechamiento de recursos de origen biológico en la Cuenca de México (2500 antes de Cristo–1500 después de Cristo)”, *Geofísica Internacional*, núm. 26, pp. 15-28.
- Melo Gallegos, C. (2002), *Áreas naturales protegidas de México en el siglo XX*, Temas Selectos de Geografía de México (I.6.2), Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Molins Fábrega, N. (1954), “El Códice Mendocino y la economía de Tenochtitlan”, *Revista Mexicana de Estudios Antropológicos*, núm. XIV, pp. 303-335.
- Mooser, F. (1975), “Historia geológica de la Cuenca de México”, en *Memoria de las obras del drenaje profundo del Distrito Federal*, tomo I, Departamento del Distrito Federal, México, pp. 7-38.

- Ochoa, R. E. y M. Solano González (1975), “El sistema de drenaje profundo”, en *Memoria de las obras de drenaje profundo del Distrito Federal*, tomo II, Departamento del Distrito Federal, México, pp. 223-226.
- Orozco y Berra, M. (1864), *Memoria para la carta hidrográfica del Valle de México*, Boix, México.
- Sepúlveda y H., M. T. (1991), “El tributo real en la Matrícula de Tributos”, en Castillo Farreras, V. M. (ed.), *La Matrícula de Tributos. Nuevos estudios*, Instituto de Investigaciones Históricas, UNAM y Secretaría de Hacienda y Crédito Público, México.
- Tricart, J. (1985), *Pro-lagos. Los lagos del eje volcánico de México*, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Wolfer, J. (1975), “La hidrología”, en *Memoria de las obras de drenaje profundo del Distrito Federal*, tomo I, Departamento del Distrito Federal, México, pp. 51-61.
- Zamorano Orozco, J. J. (2005), “Formas del relieve en la Cuenca de México”, en Gutiérrez de MacGregor, M. T., J. González Sánchez y J. J. Zamorano Orozco (2005), *La Cuenca de México y sus cambios demográfico-espaciales*, Temas Selectos de Geografía de México (I.8.1), Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 17-42.
- Zamorano Orozco, J. J. y J. González Sánchez (1999), “Geomorphological processes, natural hazards and their socio-spatial differentiation in Mexico City”, en Aguilar, A. G. e I. Escamilla (eds.), *Problems of Megacities: social inequalities, environmental risk and urban governance*, Instituto de Geografía, UNAM and Commission of Urban Development and Urban Life-IGU, México, pp. 295-310.

Capítulo 2. Eutroficación y restauración de la calidad del agua de los canales de Xochimilco

Martín López Hernández

Laboratorio de Limnología, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología
Universidad Nacional Autónoma de México

María Guadalupe Ramos Espinosa

Departamento de Producción Agrícola y Animal
Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco

Patricia Martínez Cruz

Departamento de Sistemas Biológicos
Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco

Antonio Flores Macías

Departamento de Producción Agrícola y Animal
Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco

Introducción

Las características biológicas y fisicoquímicas del agua de los canales de Xochimilco se relacionan con dos aspectos: las actividades productivas que se desarrollan en sus alrededores y el agua que los abastece. De acuerdo con las primeras, la zona puede dividirse en cinco áreas: agrícola, pecuaria, pesquera, turística y urbana; en tanto que el agua que abastece los canales proviene en un 96.25% de la planta de tratamiento de Cerro de la Estrella que comenzó a funcionar en 1971 (efluente de 4 000 L s⁻¹), y el restante 3.75% proviene de la planta de San Luis Tlaxiatalmalco que comenzó a funcionar en 1990 (efluente de 150 L s⁻¹), (DDF, *s/f*).

Balanzario (1982) señala que la primera planta tratadora aporta grandes cantidades de desechos orgánicos, nutrimentos y otras sustancias tóxicas. Cisneros *et al.* (2005) y Camacho y Ponce de León (2005) reportan en agua bacterias coliformes y en sedimento metales pesados como Vanadio, Cromo y Plomo con una distribución descendente conforme hay un alejamiento de la zona urbana, mientras otros metales como Cobalto y Níquel presentan una concentración ho-

mogénea. Figueroa *et al.* (2005) reportan varias especies de algas indicadoras de altas concentraciones de materia orgánica en el agua de los canales de Xochimilco, tales como *Microcystis aeruginosa*, *Anabaena* spp. y *Oscillatoria* spp.

Actualmente, uno de los usos más extendidos del agua en esta región es el riego agrícola, pese a los diversos riesgos que esto conlleva, tales como contaminación de hortalizas por organismos patógenos, presencia de metales pesados y salinización de las tierras irrigadas. El uso de humedales es una alternativa para mejorar la calidad del agua; éstos consisten en sistemas que utilizan macrofitas acuáticas, mismas que se reproducen rápidamente y tienen la capacidad de absorción de contaminantes (Comín *et al.*, 1997; Olguín, 2002; Martínez *et al.*, 2006). Su biomasa radicular asegura una actividad microbiana en todas las estaciones del año sin producir olores; la vegetación en su conjunto incrementa o mantiene la diversidad ambiental de la zona y, al mismo tiempo, constituyen hábitat para la fauna, integrándose de manera natural al paisaje (Tchobanoglous, 1997; Seoáñez, 1999; Steer *et al.*, 2003). Entre las principales desventajas de los humedales está la pérdida de agua por evapotranspiración, trayendo como consecuencia un aumento de la salinidad del efluente (Lahora, 1998).

Este estudio tuvo como objetivos: *a)* evaluar la fluctuación de fósforo y nitrógeno del agua de los canales en las épocas de sequía y lluvia; *b)* emplear ríos artificiales para estudiar el efecto del agua tratada en la planta de Cerro de la Estrella sobre microalgas y *c)* evaluar la eficiencia de un humedal artificial para la remoción de contaminantes de las aguas del Canal Nacional.

Metodología

Fluctuaciones de fósforo y nitrógeno en los periodos de sequía y lluvia

Con el apoyo de una imagen satelital se seleccionaron tres sitios representativos de actividades productivas específicas (agricultura, ganadería y pesca) y uno más que corresponde a un tubo surtidor de agua tratada ubicado en Canal Nacional (Figura 1, Tabla 1). Los sitios representativos fueron ubicados en el terreno mediante un Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés) y posteriormente localizados en la imagen satelital georreferida.

En estos sitios se tomaron muestras de agua a una profundidad de 30 cm, en los meses de mayo (representativo del periodo de sequía) y septiembre (representativo del periodo de lluvia); en laboratorio se les determinó el contenido ortofosfato, fósforo total, amonio y nitrato de acuerdo con los procedimientos y normas establecidas (APHA-AWWA-WPCF, 1995).



Figura 1. Ubicación de las zonas de muestreo de acuerdo con su actividad productiva y tubo surtidor en canal Nacional (fuente: <http://www.googleearth.com>; febrero de 2008).

Construcción de ríos artificiales

Para evaluar si el agua tratada aportaba nutrimentos, así como su incidencia en la producción de clorofila y biomasa de las microalgas que habitan en el agua de los canales, se montaron ríos artificiales en el CIBAC (Centro de Investigaciones Biológicas y Acuícolas de Cuernavaca, México, D. F., UAM), utilizando agua de dos zonas (agrícola y de pesca); en ellos se simuló el flujo de agua en los canales de la zona estudiada. El sistema, también denominado microcosmos de flujo continuo, consistió en cuatro grupos de cinco canales de 90 cm de longitud con

Tabla 1. Geoposicionamiento de las zonas muestreadas

Zona agrícola	19° 17' 01.85'' N 99° 05' 36.04'' W
Zona ganadera	19° 16' 57.18'' N 99° 04' 13.35'' W
Zona de pesca	19° 17' 27.76'' N 99° 05' 57.99'' W
Tubo surtidor de agua tratada	19° 15' 53.38'' N 99° 06' 28.81'' W

flujo continuo de 1.5 cm³ s⁻¹ logrado con bombas sumergibles con capacidad de 144 L h⁻¹ y regulado con válvulas de paso. En cada canal se colocaron sobre bases plásticas ranuradas 20 portaobjetos paralelos a la corriente y separados entre sí para promover la colonización y fijación de microalgas (Figura 2; López *et al.*).

A dos contenedores o recipientes plásticos no transparentes receptores se les añadió agua de la zona agrícola y a los otros dos de la zona de pesca. Después de cuatro semanas de colonización de algas sobre los portaobjetos, a uno de los contenedores de cada tipo de agua (zona agrícola y de pesca), se les retiró el agua inicial y se les agregó agua tratada proveniente del tubo surtidor, a estos contenedores se les denominó experimentales.

Durante dos meses, cada dos semanas se removieron dos portaobjetos al azar de cada canal para cuantificación de clorofila *a* (representativa de la comunidad algal) y biomasa total (indicador de la proporción orgánica e inorgánica). La determinación espectrofotométrica de clorofila *a* y biomasa total como cenizas, se efectuaron de acuerdo con las técnicas de Lind (1985) y APHA-AWWA-WPCF (1995), respectivamente. Al principio del experimento se le determinó al agua la concentración de fósforo total, N-amonio y N-nitrato, se le hizo lo mismo al agua tratada cuando se añadió a los lotes experimentales (APHA-AWWA-WPCF, 1995).

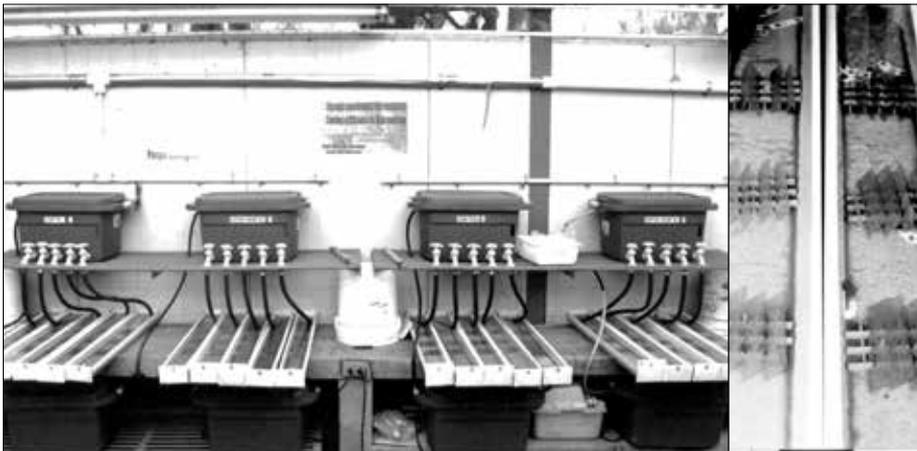


Figura 2. Ríos artificiales que simulan el flujo de agua de los canales y colocación de portaobjetos.

Humedal artificial como alternativa

Para evaluar la capacidad de un humedal artificial en la remoción de nutrimentos del agua, se construyó un prototipo de humedal artificial en el área agrícola del CIBAC de acuerdo con las recomendaciones de Comin *et al.* (1997); Lahora (1998); Seoáñez (1999) y Olguín *et al.* (2002), pero modificado con el objeto de utilizar materiales de la región y con la profundidad suficiente para la extracción de agua a través de una motobomba de riego agrícola. El prototipo consistió en tres estanques de 2 x 1.20 m y 0.40 m de profundidad, cada uno sembrado con diferentes especies de plantas acuáticas presentes en los canales de Xochimilco; el primero con shacaltule (*Scirpus americanus*), el segundo con tule (*Typha latifolia*) y el tercero con lirio acuático (*Eichornia crassipes*; Figura 3). Mediante una motobomba de 1 HP se hizo pasar el agua de un estanque al otro, dejando un tiempo de retención de 15 días en cada uno (Ramos *et al.*, 2007).

En muestras de agua tomadas en el influente y efluente se determinaron ortofosfato, fósforo total, amonio, nitrato, conductividad eléctrica y Demanda



Figura 3. Diseño del humedal artificial.

Química de Oxígeno (DQO). En los mismos puntos se tomaron muestras de agua para obtener el número más probable de coliformes totales y fecales en el agua de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-112-SSA1-1994. Al inicio y al final del proceso, se cuantificó en el agua el contenido de cadmio y plomo utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica GBC Modelo 932 con límite de detección de 0.005 mg l⁻¹ para cadmio y 0.025 mg l⁻¹ para plomo de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-AA-051.

Resultados

Fluctuaciones de fósforo y nitrógeno en los periodos de sequía y lluvia

Comparando el agua de los cuatro sitios muestreados (Figura 4), se observa una mayor concentración de compuestos fosfatados en la zona agrícola, posiblemente debido al uso de fertilizantes. En cuanto a los compuestos nitrogenados, se evidencia una mayor concentración de nitrato en el agua tratada durante ambas épocas estudiadas; particularmente durante la época de lluvia, también se observan en las zonas pecuaria y agrícola concentraciones elevadas de nitrato, lo que podría atribuirse al acarreo de desechos del ganado bovino y compuestos nitrogenados utilizados en la agricultura. La zona de pesca presentó los valores más bajos de las variables analizadas durante las dos épocas comparadas. A excepción del

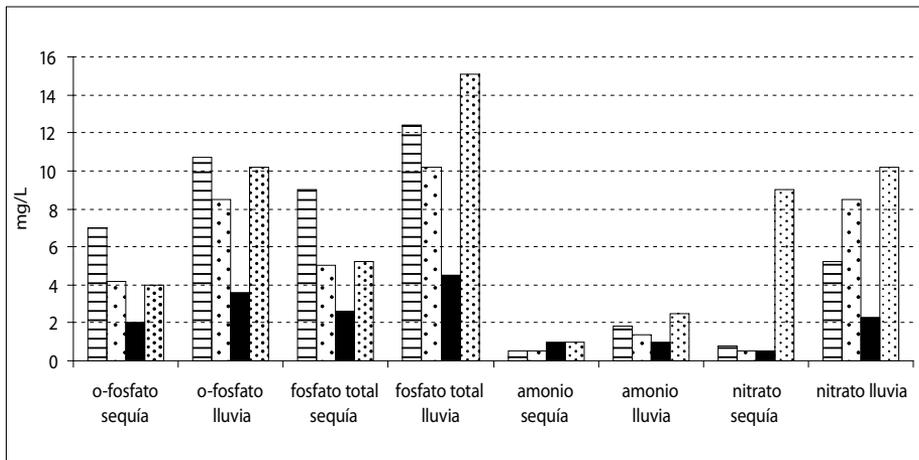


Figura 4. Niveles cuantificados de ortofosfato, fósforo total, amonio y nitrato, en las zonas monitoreadas durante los meses de sequía y lluvia. ■ Agrícola, ▨ Pecuaria, ■ Pesca y ▩ Agua tratada.

amonio, el agua tratada presenta concentraciones altas de los nutrimentos, lo que indica deficiencia en el tratamiento de la planta de Cerro de la Estrella.

Efecto del agua tratada sobre las microalgas

Las concentraciones de nutrimentos en el agua de las zonas agrícola y de pesca, se registraron cuando los ríos artificiales comenzaron a funcionar, lo mismo se hizo con el agua proveniente de la planta de tratamiento cuando se sustituyó el agua original en los lotes experimentales (Tabla 2). Se observa que en el agua tratada, los parámetros registran valores más altos respecto al agua con la que se inició el estudio.

a) Evaluación en la concentración de clorofila *a*

Como resultado de los nutrimentos presentes en el agua, hubo un incremento poblacional de las algas llegando a un máximo y posteriormente a un decremento reflejado por la clorofila *a* (Figura 5); al final de esta etapa que ocurrió a la octava semana, les fue sustituida el agua original (zona agrícola y de pesca) por la proveniente del tubo surtidor de Canal Nacional, luego de lo cual hubo una recuperación de las comunidades, probando que el agua proveniente de la planta de tratamiento llega con nutrimentos.

b) Evaluación en la biomasa algal

De acuerdo con los resultados de la cuantificación de biomasa algal empleando agua de las zonas agrícola y de pesca, y sustituyendo éstas con la proveniente del tubo de abastecimiento de Canal Nacional (Figura 6), se observa un incremento en la población cuando se emplean aguas tratadas, de tal modo que puede correlacionarse la clorofila tipo *a* y la biomasa, ya que el perfil obtenido en ambos casos es similar.

Tabla 2. Concentración de nutrimentos del agua utilizada en los ríos artificiales

Tipo de agua empleada	Fósforo total (mg L ⁻¹)	Amonio (mg L ⁻¹)	Nitrato (mg L ⁻¹)
Agua de zona agrícola	3.85	0.39	1.20
Agua de zona de pesca	4.45	0.52	3.32
Recambio con agua de abastecimiento	5.32	0.82	2.11

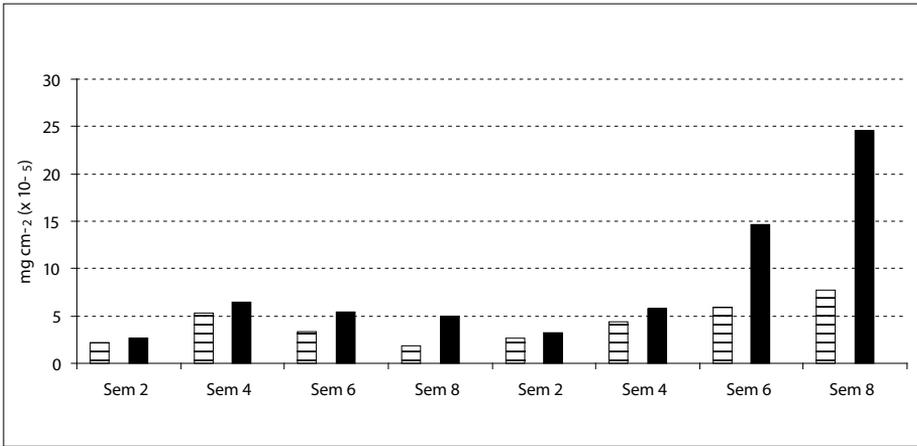


Figura 5. Datos de clorofila a: antes y después de añadir el agua tratada. ▨ Agrícola y ■ Pesquera.

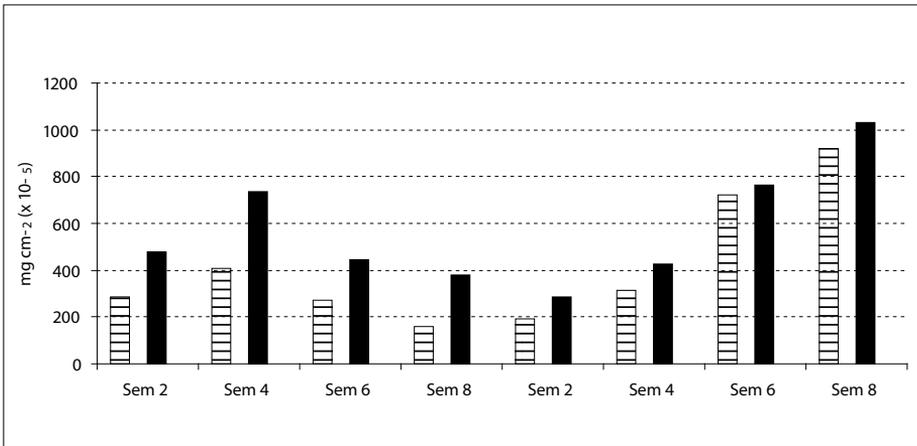


Figura 6. Datos de biomasa algal: antes y después de añadir el agua tratada. ▨ Agrícola y ■ Pesquera.

Eficiencia del humedal artificial en la remoción de nutrientes

Cuando se empleó el humedal en el tratamiento de agua del Canal Nacional, los valores registrados en el agua del efluente indicaron que los parámetros fisicoquímicos disminuyeron, excepto el nitrato y la conductividad eléctrica; esto último

se atribuyó principalmente a la evapotranspiración y a la evaporación del agua retenida durante más de seis semanas en el sistema completo, aún así, esta agua se considera de buena calidad para riego agrícola, con salinidad media y sodicidad baja (C2-S1) de acuerdo con la Norma de Riverside (Cadaña y Lucerna, 2000). El Pb y el Cd se mantuvieron por debajo del límite permisible durante todo el experimento de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, los cuales son: 0.2 mg/L para cadmio y 0.5 mg/L para plomo. El sistema demostró ser eficiente en relación con la calidad sanitaria y con la reducción de fosfato, amonio y DQO, pero no en cuanto a concentración de sales (Tabla 3).

Al evaluar los resultados de los análisis microbiológicos realizados (Tabla 4) se observa que las concentraciones de coliformes totales y fecales en el agua del Canal Nacional (control) sin tratar, son muy altos (2400 y 1600 NMP/100 ml, respectivamente), sin embargo, éstos fueron disminuyendo conforme pasaban de un estanque a otro, de tal modo que se lograron remover al final del tratamiento hasta en un 94.17% y 91.25%, ya que en ambos casos se cuantificaron 140 NMP/100 mL. La remoción de coliformes fue eficiente, ya que el límite máximo permisible de coliformes fecales en agua de riego es de 240 NMP/100 mL, según la NOM-33-ECOL-1993.

Tabla 3. Valores obtenidos de los parámetros determinados a los 45 días de tratamiento en el humedal artificial

Parámetros	Agua del influente	Agua del efluente	Porcentaje de remoción
Conductividad eléctrica mS/cm	34.4	66.4	93*
Demanda química de oxígeno (mgO ₂ /L)	416	120	71
Fosfato (mg/L)	10.3	2.3	77
Amonio (mg/L)	1.451	0.0003	99.9
Nitrato (mg/L)	0.60	0.82	36*
Cadmio (mg/L)	0.003	0.005	Aumento no significativo
Plomo (mg/L)	0.070	0.025	Disminución no significativa

*aumentaron.

Tabla 4. Porcentaje de reducción de coliformes en el sistema de humedal

Condición	Coliformes NMP/100 ml		% de reducción coliformes	
	Totales	Fecales	Totales	Fecales
Control: agua sin tratar	2400	1600		
1er tratamiento: estanque con shacaltule	920	920	61.67	42.50
2º tratamiento: estanque con tule	170	110	81.52	88.04
3er tratamiento: estanque con lirio	140	140	17.65	27.27*
% de remoción total			94.17	91.25

* aumentó respecto al segundo tratamiento.

Conclusiones

Los datos revelaron altas concentraciones de ortofosfato, fósforo total, amonio y nitratos en los cuatro tipos de agua muestreada, reflejando condiciones de eutrofización generalizada. La concentración de estas cuatro variables se elevó durante la época de lluvia en los cuatro sitios debido quizá al arrastre de elementos procedentes de zonas aledañas.

Se registró una mayor concentración de compuestos fosfatados en la zona agrícola y una mayor concentración de nitrato en el agua tratada, aunque en época de lluvia éste también es elevado en la zona pecuaria y agrícola. La zona de pesca que corresponde a la zona de recuperación ecológica, presentó los valores más bajos de las variables analizadas durante las dos épocas comparadas.

El agua tratada presenta concentraciones altas de los nutrientes analizados, excepto amonio, lo que indica deficiencia en el tratamiento del agua por parte de la planta de Cerro de la Estrella; estos nutrientes favorecen el crecimiento de microalgas, lo cual se probó con el sistema de ríos artificiales a través de clorofila *a* y biomasa que reflejaron un modelo de crecimiento semejante.

El prototipo del humedal artificial probó su eficiencia para disminuir la demanda química de oxígeno, fosfato y amonio, así como para la remoción de coliformes totales y fecales presentes en el agua del Canal Nacional, obteniendo al final agua de calidad para riego agrícola.

Agradecimientos

Este proyecto fue parcialmente financiado por el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología a través del Laboratorio de Limnología y la División de CBS de la UAM-X, a través de los Departamentos de Producción Agrícola y Animal y de Sistemas Biológicos. Agradecemos al Biólogo Alberto Islas Grajeda por su apoyo en la construcción de los microcosmos.

Referencias

- APHA-AWWA-WPCF (1995), *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 19th edition, American Public Health Association, Washington, D.C., pp 1-42 a 1-44, 4-145 a 4-168, 4-187 a 4-191, 5-12 a 5-18.
- Balanzario, Z. J. (1982), "Contaminación de los canales de Xochimilco y repercusión en las actividades económicas", *Boletín de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística*, UNAM, México, p. 284.
- Cadahia L. C. y J. J. M. Lucerna (2000), "Diagnóstico de nutrición y recomendaciones de abonado", en Cadahia, L. (ed.), *Fertirrigación. Cultivos, hortalizas y ornamentales*, Mundi-Prensa, México, pp. 173-246.
- Camacho Flores, J. L. y C. Ponce de León (2005), "Cuantificación de metales pesados en sedimentos de canales en Xochimilco Ciudad de México", en *Primer Coloquio Franco-Mexicano Chinampas y hortillonnages: territorios intraurbanos frágiles entre tierra y agua*, México.
- Cisneros Iturbe, L. P., P. Islas Macías y M. Mazari Hiriart (2005), "Aspectos ambientales relacionados con la calidad del agua superficial en Xochimilco, Distrito Federal", en *Primer Coloquio Franco-Mexicano Chinampas y hortillonnages: territorios intraurbanos frágiles entre tierra y agua*, México.
- Comín, F. A., J. A. Romero, V. Astorga y C. García (1997), "Nitrogen removal and cycling in restored wetlands used as filters of nutrients for agricultural runoff", *Water Science Technology* 35(5), pp. 255-261.
- DDF (s/f), *Planta de tratamiento de aguas residuales Cerro de la Estrella*, Departamento del Distrito Federal, Secretaría General de Obras, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, México.
- Figuroa-Torres, M. G., D. Santos, A. Velasco A., M. López-Hernández, M. G. Ramos-Espinosa y M. Arienti (2005), "Composición e importancia de la ficoflora de Xochimilco", en *Primer Coloquio Franco-Mexicano Chinampas y hortillonnages: territorios intraurbanos frágiles entre tierra y agua*, México.

- Lahora, A. (1998), "Los humedales artificiales como tratamiento terciario de bajo costo en la depuración de aguas residuales urbanas", *Memorias del Encuentro Ambiental Almeriense: en busca de soluciones*, Universidad de Almería, Diputación Provincial de Almería, Grupo Ecologista Mediterráneo, Instituto de Estudios Almerienses, Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, Almería, España, 27 de septiembre, 2004 [<http://www.gem.es/MATERIALES/DOCUMENT/DOCUMENTEN/go1/d01203/d01203.htm>].
- Lind, O. T. (1985), *Handbook of common methods in Limnology*, Kendall/Hunt Publ. Co.
- López-Hernández, M., M. G. Ramos-Espinosa y M. G. Figueroa-Torres (en prensa), "Efecto de agua tratada sobre comunidades acuáticas de dos sistemas lacustres de Xochimilco, México", en Sorani-Dalbon, V. (comp.), *Entre tierra y agua. Experiencias franco-mexicanas en humedales intra y periurbanos en chinampas y hortillonages*, Universidad Autónoma de Morelos.
- Martínez-Cruz P., A. Hernández-Martínez, R. Soto-Castor, A. Esquivel Herrera and J. Rangel Levario (2006), "Use of constructed wetlands for the treatment of water from an experimental", *Hidrobiológica* 16(3), pp. 211-219.
- Norma Oficial Mexicana (1993), (NOM-33-ECOL-1993), "Establece las condiciones bacteriológicas para el uso de aguas residuales de origen urbano o municipal o de la mezcla de éstas con la de los cuerpos de agua en el riego de hortalizas y productos hortofrutícolas", *Diario Oficial de la Federación*, México, 18 de octubre de 1993.
- Norma Oficial Mexicana (1995), (NOM-112-SSA1-1994), "Determinación de bacterias coliformes. Técnica del número más probable", *Diario Oficial de la Federación*, México, 19 de octubre de 1995.
- Norma Oficial Mexicana (1996), (NOM-001-ECOL-1996), "Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales", *Diario Oficial de la Federación*, México, 24 de junio de 1996.
- Norma Mexicana (1982), (NMX-AA-051), "Aguas-determinación de metales-método espectrofotométrico de absorción atómica", *Diario Oficial de la Federación*, México, 22 de febrero de 1982.
- Olgún, E., E. Hernández, P. Coutiño y R. González (2002), "Aprovechamiento de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales", *Tecnologías ambientales para el desarrollo sustentable*, 19 de marzo de 2002, pp. 1-7 [<http://homepage.westmont.edu/u/outside/phil.soderman/www/tab.htm>].
- Ramos-Espinosa M. G., L. M. Rodríguez-Sánchez y P. Martínez-Cruz (2007 **en prensa**), "Uso de macrofitas acuáticas en el tratamiento de aguas para el cultivo de maíz y sorgo. Evaluación del desarrollo inicial de sorgo y maíz empleando aguas tratadas en humedales artificiales", *Hidrobiológica*, núm. 17, pp. 7-15.
- Seoánez, C. M. (1999), *Aguas residuales: tratamiento por humedales artificiales*, Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, pp. 51-57.

- Steer, D., T. Aseltyne and L. Fraser (2003), "Life-cycle economic model of small treatment wetlands for domestic wastewater disposal", *Ecological economics*, 44, pp. 359-369.
- Tchobanoglous, G. (1997), "Land-based systems, constructed wetlands and aquatic plant systems in the United States: an overview", Cap. 6, in *Ecological engineering for wastewater treatment*, 2a. ed., CRC Press, Inc., pp. 77-87.

Capítulo 3. Análisis hiperespectral de tres remantes de cuerpos de agua en la Cuenca de México

Raúl Aguirre Gómez

Laboratorio de Análisis Geoespacial, Instituto de Geografía
Universidad Nacional Autónoma de México

Introducción y antecedentes

La Cuenca de México es una altiplanicie rodeada de montañas volcánicas que se localiza en la parte centro-oriente del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano. Sus coordenadas extremas están entre los meridianos 98°15' - 99°30' oeste y los paralelos 19° 00' - 20° 15' norte. Su altitud varía de 2 240 msnm en el sur a 2 390 msnm en el norte. Tiene una longitud máxima de 110 km, en la dirección norte-sur y una mínima de 80 km en la dirección este-oeste. Tiene un área aproximada de 9 600 km² y abarca diferentes entidades federativas como el Distrito Federal y los estados de México, Hidalgo, Tlaxcala y Puebla.

La Cuenca del Valle de México es endorreica, o hidrológicamente cerrada (con desagüe artificial en la actualidad); está rodeada por altas montañas boscosas con una altitud promedio de 3 000 msnm. En su extremo sureste alcanza las máximas altitudes de más de 5 000 m, como es el caso de los volcanes Popocatepetl (5 452 m) e Iztaccíhuatl (5 286 m), los cuales tienen cimas cubiertas por nieves perennes.

Los límites de la Cuenca de México son: hacia el sur la Sierra de Chichinautzin, la del Ajusco y la Sierra de Zempoala; al suroeste y oeste la Sierra de las Cruces y la de Monte Alto; al noroeste la Sierra de Tepozotlán; al norte la Sierra de Tezontlalpan y la de Pachuca, Chiconautla y Tepozán y al sureste y este la Sierra Nevada formada por los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Telapón, Tlaloc y Papayo.

Los rasgos morfológicos actuales de la Cuenca de México quedaron establecidos durante el cuaternario superior aunque las actividades tectónicas y volcánicas aún están presentes, lo cual se puede constatar con la reciente actividad del volcán Popocatepetl desde finales de 1994 hasta el momento actual.

Por sus características geomorfológicas la Cuenca de México ha sido dividida en cuatro unidades de relieve: *a)* relieve montañoso, *b)* piedemonte, *c)* planicies proluviales-lacustres y *d)* planicies lacustres.

En la Cuenca existían planicies lacustres, las cuales ocupaban la parte más baja del embalse, también varios lagos, entre los que destacaban el lago de Texcoco –de agua salada– y el de México, localizado al oeste del anterior, que era largo y angosto –de agua dulce. El Lago de México estaba situado a un nivel más alto que el lago de Texcoco.

Las características hidrológicas de la Cuenca favorecieron la formación de los cuerpos lacustres siguientes: Zumpango, Xaltocan-San Cristóbal, Texcoco y Xochimilco-Chalco. Sin embargo, la morfología de la planicie lacustre no se conserva debido a las modificaciones de tipo antropogénico que se han dado desde tiempos históricos. Entre las modificaciones antrópicas más importantes ocurridas en la planicie lacustre están la fundación de Tenochtitlán en el siglo XIV: la construcción de calzadas-dique que modificaron el régimen hidrológico; la construcción del túnel y tajo de Nochistongo en 1607; la construcción del túnel de Tequixquiac en 1954 y la obra del drenaje profundo de la Ciudad de México en 1974. Estas obras han propiciado la desecación de la planicie lacustre y, fomentado, en consecuencia, la expansión de asentamientos urbanos. En la región de Xochimilco-Chalco existían islotes artificiales construidos en los lagos con fines agrícolas. En la actualidad los cuerpos de agua de la Cuenca de México han desaparecido virtualmente, quedando tan solo algunos relictos. Entre los remanentes naturales más importantes se pueden mencionar el lago de Tecocomulco, el de Zumpango y la presa de Guadalupe, al norte de la Cuenca; hacia el sur de ésta los cuerpos de agua con una dimensión importante son virtualmente nulos. Sin embargo, persisten algunos de interés como son el lago de Xochimilco y varios de sus canales que se extienden hacia la región de Tláhuac y Chalco. Existen, además, lagos urbanos artificiales de importancia como son Chapultepec, Tláhuac y el Nabor Carrillo, principalmente.

El seguimiento de la paulatina reducción de la planicie lacustre desde la época precortesiana hasta la década de los años setenta, tiene que hacerse mediante la investigación de documentos históricos (cartas, mapas y planos). En la actualidad, sin embargo, con el advenimiento de los satélites artificiales, a mediados de los setenta, y la fotografía área digital, en años recientes, ha sido posible hacer un seguimiento cuantitativo de la variación espacial de los remanentes de cuerpos de agua en la Cuenca de México. Esta tecnología permite observar la variación espacio-temporal que han sufrido estos embalses en los últimos 30 años.

Existen algunos estudios que han analizado la Cuenca de México mediante sensores remotos (Prol *et al.*, 2002; De la Lanza y Gómez, 2005). Sin embargo, no hay ninguna aportación dedicada al estudio de los cuerpos de agua de la Cuenca de México, en su totalidad, utilizando sensores remotos.

Por otro lado, existen estudios que han analizado el estado trófico de lagos urbanos de la Ciudad de México (Martínez y Jáuregui, 2000), pero sin utilizar técnicas de percepción remota (PR).

Ahora bien, es posible hacer una evaluación puntual más precisa con el apoyo de sensores remotos hiperspectrales que proporcionen una perspectiva actual de las condiciones de estos embalses con mediciones de reflectancia *in situ*. La validación de esta información debe ser hecha con trabajo de campo con el fin de calibrar los datos obtenidos con este tipo de sensores y la medición de la concentración de pigmentos fotosintéticos presentes en los cuerpos de agua (clorofilas a, b, c, y carotenos).

El objetivo de este capítulo es analizar la respuesta espectral de tres cuerpos de agua de la Cuenca de México: Zumpango, Xochimilco y Tecocomulco, mediante el uso de un sensor remoto hiperspectral. Una de las ventajas que ofrece este tipo de estudio es que permite realizar análisis utilizando funciones matemáticas más sofisticadas que las empleadas en el análisis de imágenes satelitales con valores discretos.

El capítulo está estructurado de la siguiente manera: la primera sección presenta las características relevantes de los cuerpos de agua incluidos en este estudio. Posteriormente, se hace una descripción de la metodología empleada y, finalmente, se analizan los resultados y se establecen las conclusiones arrojadas por este estudio.

Características de las áreas en estudio

Lago de Tecocomulco, Hidalgo

El lago de Tecocomulco se ubica en la parte sureste del estado de Hidalgo, dentro de los municipios de Tepeapulco, Apan y Cuauhtepac de Hinojosa, a 46 km de Pachuca. Geográficamente está localizada entre los paralelos 19°53'20" y 19°50'08" de latitud norte y los meridianos 98°21'54" y 98°25'44" de longitud oeste y tiene una altitud media de 2 514 msnm. Fisiográficamente el lago de Tecocomulco está comprendido en la provincia del Eje Volcánico Transversal. Pertenece a la Región Hidrológica No. 26 (RH26) del río Pánuco e hidrográficamente forma parte de la Cuenca de México.

El lago de Tecocomulco es considerado como el último humedal relictos del antiguo sistema lacustre que predominó en la Cuenca de México. Se comporta como un vaso regulador para recarga de acuíferos de la región. Su importancia radica en ser un lugar de anidación, reproducción y paso de gran cantidad de especies de aves acuáticas y terrestres características de lo que fueron los antiguos lagos (Figura 1).

Está delimitado por elevaciones volcánicas del terciario y cuaternario (Mooser *et al.*, 1996): el Chichicuahtla al NW y el Tepozán al SE. Hacia el norte y al este está delimitada por los cerros pertenecientes a las estibaciones de la sierra norte de Puebla. Hacia el sur y suroeste está confinada por los cerros de Carlota, Xihungo, Viejo de Tultengo, Viejo de la Palma, Volcán Coatzetzengo, San Miguel y otros, que funcionan como parteaguas de las cuencas vecinas de Apan y Tlanalapa. De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por García (1988), la región de Tecocomulco tiene un clima templado (12-18° C) y sub-húmedo (C_{wi}) con precipitación estival (630 mm/año). La extensión del lago puede alcanzar hasta 15 km², variando de acuerdo con la precipitación anual y estacional.

La Cuenca es alimentada por los ríos Coatlico, Coyuco y Tepozan, además de otras escorrentías de menor importancia que bajan por los cerros circundantes. La parte central de la Cuenca recibe aportaciones de corrientes pluviales for-



Figura 1. Lago de Tecocomulco, estado de Hidalgo.

madras en las laderas de los cerros aledaños, con un volumen aproximado de 12.5 millones de m³. Los escurrimientos en el lago son de régimen intermitente con fuertes avenidas y transporte de gran cantidad de azolves debido a la deforestación de las partes altas de la Cuenca.

De acuerdo con la clasificación de humedales propuesta por Dugan (1992), el lago de Tecocomulco se ubica dentro de los sistemas lacustrinos, esto es, son depósitos de agua formados por depresiones causadas por fenómenos de origen volcánico. Es un cuerpo de agua somero (1-2.5 m) con aguas turbias con un máximo de un metro de visibilidad Secchi, un pH de 6.8 y una conductividad eléctrica relativamente baja de 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Existen asociaciones de plantas que se han establecido en función de la profundidad del cuerpo de agua (Lot y Novelo, 1978). En el lago se mantienen conservadas asociaciones de hidrófitas emergentes, hidrófitas libremente flotantes e hidrófitas sumergidas. En la porción central en áreas de agua permanente es muy abundante el tule (*Scirpus lacustris* y *Typha latifolia*), formando densas masas que cubren un 85%; en áreas abiertas entre los parches de *Scirpus* se encuentran plantas sumergidas (*Najas guadalupensis*) y en las orillas se presenta vegetación flotante, principalmente lentejuela de agua (*Lemna gibba*) en gran cantidad.

Lago de Xochimilco, Distrito Federal

El lago de Xochimilco es un sistema lacustre que se ubica en la parte centro-sureste del Distrito Federal, México (19° 18' N y 99° 7' W); con una altitud promedio en la zona de llanuras o lacustre de 2 240 msnm. El sistema lacustre de Xochimilco se ubica, fisiográficamente, en la provincia del eje neovolcánico, subprovincia de lagos y volcanes del Anáhuac, en el extremo sur de la Cuenca de México. El sistema lacustre presenta una superficie de 2 657 ha. Constituye un ecosistema remanente del gran lago que ocupaba la Cuenca de México, donde se fusionaban los lagos de Xochimilco, Chalco, Xaltocan, Zumpango y Tenochtitlán con el lago de Texcoco. Actualmente, el sistema está reducido a una serie de canales, acequias o apantles, lagos permanentes y otros de temporal, que forman un área natural de descarga del flujo subterráneo, y que proporcionan agua a partir de un acuífero. Este sistema funciona como regulador de flujos en el ámbito local y regional.

Su importancia, en términos de biodiversidad está determinada por la presencia de comunidades vegetales características como las islas flotantes compuestas por tule (*Typha latifolia*, *Schoenoplectus americanus*, *Scirpus americanus*, y en menor proporción *Cyperus sp.*, *Juncus sp.*, entre otras). Alberga gran cantidad de especies de flora y fauna acuática y terrestre.

El sistema lacustre de Xochimilco se originó al final del periodo terciario superior y principios del cuaternario; durante esta fase, la parte sur de la Cuenca fue obstruida por la formación de la Sierra del Chichinautzin, surgiendo la cuenca endorreica de México. Geomorfológicamente se divide en tres unidades: llanura lacustre, llanura lacustre-salina y llanura aluvial, mientras que su área de influencia hacia la parte sur se clasifica como pie de monte o zona de “transición”. Por su topografía, la zona se ubica en un terreno plano de origen lacustre correspondiente al antiguo vaso del lago de Xochimilco, cuya pendiente varía entre 0-5%. Al sur, se localiza el área montañosa formada por los cerros Xochitepec y Cantil, así como los volcanes Teoca, Zompole y Teutli.

El lago de Xochimilco pertenece a dos regiones hidrológicas: *a*) la región del Pánuco (RH26), en la cuenca del río Moctezuma, subcuenca lago Texcoco-Zumpango en la cual se ubica el lago en su totalidad así como la mayor parte de las escorrentías de las montañas circundantes (INEGI, 1998) y *b*) la región hidrológica del Balsas (RH18), en la cuenca del Río Grande de Amacuzac, subcuenca río Apatlaco (INEGI, 2001) la cual es la principal zona de captación del lago de Xochimilco, la cual está localizada en el extremo sur de la Cuenca de México, en la Delegación Tlalpan; la zona lacustre se ubica al NE de esta zona de captación, cuyo flujo se da en dirección suroeste-noreste.

Se estima una longitud aproximada de 203 km de canales conectados entre sí; entre los más importantes se encuentran: Cuemanco, Nacional, Chalco, Del Bordo, Apatlaco, San Sebastián, Ampampilco, Texhuilo, Zacapa, Caltongo, Santa Cruz y Japón. Los lagos principales son Caltongo, Del Toro y el lago de conservación de flora, fauna y acuacultura de San Gregorio Atlapulco. Actualmente, los canales y lagos son alimentados artificialmente con agua tratada de las plantas del Cerro de la Estrella, cuyo aporte es de alrededor de $1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$; San Luis Tlaxialtemalco, que aporta $0.225 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$; además de la planta de San Lorenzo Tezonco. Otra fuente de abastecimiento son los escurrimientos superficiales originados por los ríos Santiago o Parres, San Lucas y San Gregorio, que se forman en las estribaciones de la Sierra Ajusco-Cuautzin.

El sistema lacustre es un humedal permanente con profundidades variables, en algunos canales y zonas inundadas es de 60 cm, mientras que en algunos lagos la profundidad va de 3 a 6 m. La presencia de agua en algunos sitios depende de la época del año, ya que se crean y desaparecen cuerpos de agua.

La calidad del agua es de dos tipos; en la zona que limita con las áreas montañosas y la planicie se considera cercana a condiciones naturales, debido a que recorre distancias cortas y su flujo es rápido. En los canales y lagos del sistema lacustre se considera de mala calidad debido a que son alimentados parcialmente

con agua tratada y residual, la cual contiene gran cantidad de compuestos químicos inorgánicos y orgánicos (Figura 2).

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por García (1988), el clima de la zona es templado subhúmedo con lluvias en verano, correspondiendo al tipo C(W2) (w) b (i'). La precipitación pluvial media anual es de 620.4 mm, y la mayor parte se concentra entre los meses de mayo y octubre. La temperatura media anual oscila entre los 12 y 18° C, respectivamente.

Debido a que es un cuerpo de agua léntico, se presenta una mayor retención de sedimentos, enriqueciendo el fondo del mismo, para el beneficio de los organismos, así como a la actividad agrícola en las chinampas que aprovechan dicho sedimento.

El cuerpo de agua posee vegetación acuática y subacuática (pantano). Está conformada por especies como *Lemna minuscula* (Lentejilla), *Wolffia columbiana* (chilacastle) y *Eichhornia crassipes* (lirio acuático); el lirio es la especie más prolífica y su abundancia depende de la estación del año.

En general, los canales de Xochimilco presentan eutroficación, con alto contenido de sales y baja proporción de sodio (Jiménez, 1989). En cuanto a la contaminación biológica se han obtenido registros altos de coliformes fecales, rebasando los niveles permisibles (Coutiño, 1981).



Figura 2. Lago de Xochimilco, México, D. F.

Lago de Zumpango

El lago de Zumpango se encuentra localizado en la parte noreste del Estado de México (19° 46' N, 99° 9' W). El territorio geológico circundante se caracteriza por tener una superficie plana hacia el sur, mientras que por el norte se clasifican varios lomeríos y algunos cerros al NE, con altitudes que oscilan entre 1 245 y 1 650 msnm (Cerro del Zitlaltepec). Pertenecen a la región del Pánuco (RH26), dentro de la cuenca hidrológica del río Moctezuma y la subcuenca lago Texcoco-Zumpango (INEGI, 1998). El cuerpo de agua es alimentado por agua de lluvia que se desliza por las pendientes del declive orográfico y que no es absorbida o filtrada por el suelo. Parte de este escurrimiento corre por el cauce del antiguo arroyo de las avenidas de Pachuca.

La extensión máxima del lago es de 2 000 ha, variando de acuerdo con la precipitación temporal y anual. La precipitación pluvial total por año es de 600 a 800 mm, alcanzando su máximo en junio. El clima de la zona es frío de noviembre a marzo, llegando a alcanzar temperaturas de -2.3° C, y cálido de abril a octubre con temperaturas de hasta 31° C. La media anual es de 15° C.

El lago funciona como vaso regulador y de almacenamiento con capacidad de cien millones de metros cúbicos y controla las avenidas pluviales del río Cuautitlán; regularmente ingresan poco más de 60 millones de metros cúbicos al año (Figura 3).

El ingreso del agua al lago está controlado por compuertas, por lo que sólo es alimentada en época de lluvias. El agua del embalse se utiliza principalmente para riego agrícola y, además, cumple con una importante función ambiental al crear un microclima en la región y recargar el acuífero denominado Tecámac-Nextlalpan.

En los últimos años el lago de Zumpango ha estado en un proceso de rescate. Así, en enero de 2003 fue nombrado “Santuario del Agua” y para mantener esto se realizan labores de limpieza triturando el lirio acuático (*Eichornia crassipes*) que es la especie más prolífica y su abundancia depende de la época del año. La trituración del lirio proporciona un color verdoso homogéneo al cuerpo de agua. La transparencia del lago medida con un disco Secchi del lago es de 60 a 80 cm.

Metodología

Se llevó a cabo una salida de campo durante septiembre de 2006 a los diferentes cuerpos de agua: Zumpango, Xochimilco y Tecocomulco. Para cada una de las localidades se ubicaron siete puntos de muestreo distribuidos de tal manera que cubrieran las dimensiones de los embalses. Cada uno de los puntos de muestreo



Figura 3. Lago de Zumpango, Estado de México.

fue georreferido mediante un Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés) marca Garmin. En cada punto de muestreo se tomaron mediciones de irradianza con un espectroradiómetro hiperspectral GER-1500. Este radiómetro es portátil y de rápido barrido hiperspectral; tiene un rango espectral de 380 nm a 1 100 nm. Tiene una lente objetivo con un campo de visión de 8°, lo que permite tener un enfoque preciso del blanco. Sin embargo, las mediciones de la radiación óptica se hacen a través de una apertura con un campo de visión de 1°. El GER-1500 tiene una precisión espectral de ± 2 nm. El instrumento tiene también una tarjeta integradora de 512K, la cual contiene el programa de operación del GER-1500, los factores de corrección y un almacenamiento en memoria de hasta 400 lecturas. Estas mediciones pueden ser manipuladas como archivos de salida en ASCII.

Las mediciones de reflectancia fueron hechas usando el método del Factor de Reflectancia Bi-direccional (BRF, por sus siglas en inglés). Este método se deriva de la función de distribución de Reflectancia Bi-Direccional (BDRF, por sus siglas en inglés) propuesta por Swain y Davis (1978) y Milton (1987).

El método de medición usado para obtener el BRF está basado en la utilización de una superficie “completamente reflectora” y “perfectamente difusora” como referencia. De esta manera, el factor de reflectancia está definido como el

cociente entre el flujo reflejado por un blanco bajo condiciones específicas de irradiación y observación y la superficie difusora idénticamente irradiada y observada. El significado de “perfectamente difusora” se refiere a que la superficie refleja de la misma manera en cualquier dirección; a este tipo de superficies se les conoce como “lambertianas”. Dado que los objetivos naturales no son reflectores perfectamente difusores, la intensidad del flujo reflejado varía de acuerdo con el ángulo con el que deja la superficie. Por otro lado, “completamente reflectora” significa que todo el flujo incidiendo en la superficie es reflejado por ella, es decir, no hay procesos de absorción ni de transmisión. Dado que en la práctica no existe un panel o superficie con estas características, se debe hacer una corrección que considere la reflectancia espectral del panel. Por consiguiente, el BRF se define como:

$$R(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_t(\theta_r, \phi_r)}{dL_p(\theta_r, \phi_r)} k(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) \quad (1)$$

donde dL_t es la radianza del objetivo y dL_p es la radianza del panel bajo las mismas condiciones específicas de iluminación y observación, y k es el factor de corrección del panel, el cual también depende de la configuración angular, dado que en la práctica, los paneles lambertianos son imposibles de obtener.

Con base en esto, tanto la radiación incidente como la saliente fueron medidas secuencialmente tres veces y después promediadas. Las mediciones fueron hechas entre las 9:00 y las 13:00 horas, para minimizar efectos de dispersión selectiva debidos a la oblicuidad de la radiación solar en ángulos solares cercanos al amanecer o al atardecer. Jerlov (1976) menciona, basado en hechos experimentales, que la obtención de lecturas confiables se logra en un intervalo de $\pm 45^\circ$ alrededor de la normal. En trabajos de campo esto se traduce en ± 3 horas alrededor del mediodía.

Para medir la radiación de salida, el sensor fue colocado del mismo lado soleado de la embarcación para evitar la sombra directa de ésta. Gordon (1985) usó técnicas de Monte Carlo para investigar el efecto de la sombra de las embarcaciones sobre las mediciones de irradianza y encontró que las sombras de éstas pueden producir errores de hasta un 30%. El sensor fue posicionado para obtener una visión al nadir de la superficie de agua. De acuerdo con Shifrin (1988), al colocar el sensor apuntando al nadir reduce la irradianza no deseada de la luz reflejada, la cual es independiente de las propiedades ópticas del agua. Esta configuración garantiza que la luz retrodispersada por el cuerpo de agua, proporcionando información de los elementos presentes en ella, sea el mayor contribuyente de la señal.

Por su parte, las mediciones de la radiación incidente fueron realizadas observando un panel de referencia de halón (politetrafluoretileno). Este es un panel resistente e hidrofóbico (*i. e.* lavable e insensitivo a cambios de humedad). Ambas propiedades lo hacen adecuado para investigación de campo (Weidner y Hsia, 1981; Schutt *et al.*, 1981).

Los espectros de reflectancia fueron obtenidos realizando mediciones del cuerpo de agua y luego midiendo secuencialmente sobre el panel de halón. Las mediciones del objetivo y del panel fueron divididas de acuerdo con la ecuación 1 y multiplicadas por un factor de corrección de 0.99 de acuerdo con las instrucciones de manufactura del instrumento. Los espectros de reflectancia fueron corregidos del resplandor agua/cielo, substrayendo la reflectancia medida a 750 nm de cada uno de los espectros. Esto puede realizarse dado que se asume que a esta longitud de onda el agua absorbe toda la radiación incidente. Es importante notar que este tipo de corrección puede ser impreciso en el extremo azul del espectro electromagnético.

La derivada de las curvas espectrales proporciona información sobre la presencia de máximos y mínimos. La cuarta derivada, en particular, asocia los máximos con los picos de reflectancia mientras que los mínimos con los picos de absorción (Aguirre *et al.*, 2001). El análisis por derivadas se realizó mediante un programa desarrollado con MATLAB.

Resultados y discusión

Lago de Tecocomulco

La Figura 4 muestra un compuesto RGB en falso color del lago de Tecocomulco con la distribución de los puntos de muestreo.

Las firmas espectrales medidas en este cuerpo de agua se pueden clasificar en tres grupos: el grupo A_T conformado por los puntos de muestreo 1 y 6; el grupo B_T integrado por los puntos de muestreo 2, 3 y 4; finalmente, el grupo C_T compuesto por el punto de muestreo 5. El subíndice T indica Tecocomulco (Figura 5a).

Las firmas espectrales del grupo A_T se caracterizan por su baja reflectancia y por su forma exponencial decreciente, la cual es indicativa de una fuerte componente de sustancia amarilla, proveniente principalmente de ácidos húmicos (Kirk, 1983). El espectro de reflectancia de estos dos puntos de muestreo muestra una fuerte absorción en el intervalo de longitudes de onda 420-430 nm, con picos de absorción a los 431.3 y 426.4 nm, ubicados en la parte azul del espectro e indicativos de la presencia de sustancia amarilla, la cual posee un máximo de



Figura 4. Imagen LANDSAT del lago de Tecocomulco, Hgo., y localización de los puntos de muestreo.

absorción a los 440 nm. En las regiones espectrales del verde y rojo del EEM la absorción del agua domina la señal. Cabe recordar que la sustancia amarilla es una de las componentes ópticas predominantes en aguas caso 2 (Morel y Prieur, 1977), tales como aguas costeras cercanas a descargas de ríos, o cuerpos de agua continentales someros y con presencia de vegetación. La presencia de material amarillo disuelto en cuerpos de agua continentales es notoria a simple vista. Es altamente probable que la mayor parte de la sustancia amarilla disuelta en aguas continentales sea debida a sustancias húmicas solubles provenientes de los suelos en las áreas de recarga y, por consiguiente, indirectamente de la vegetación. La sustancia amarilla de tipo húmico se puede generar también por la descomposición de plancton presente en el cuerpo de agua, lo cual es significativo en cuerpos de agua productivos. La integral de la curva espectral de estos dos puntos de muestreo fue de 4.3 y 1.78 $\text{mw nm}^{-1} \text{cm}^{-1}$. Estos valores indican una fuerte absorción de la radiación solar por el cuerpo de agua (Figura 5b).

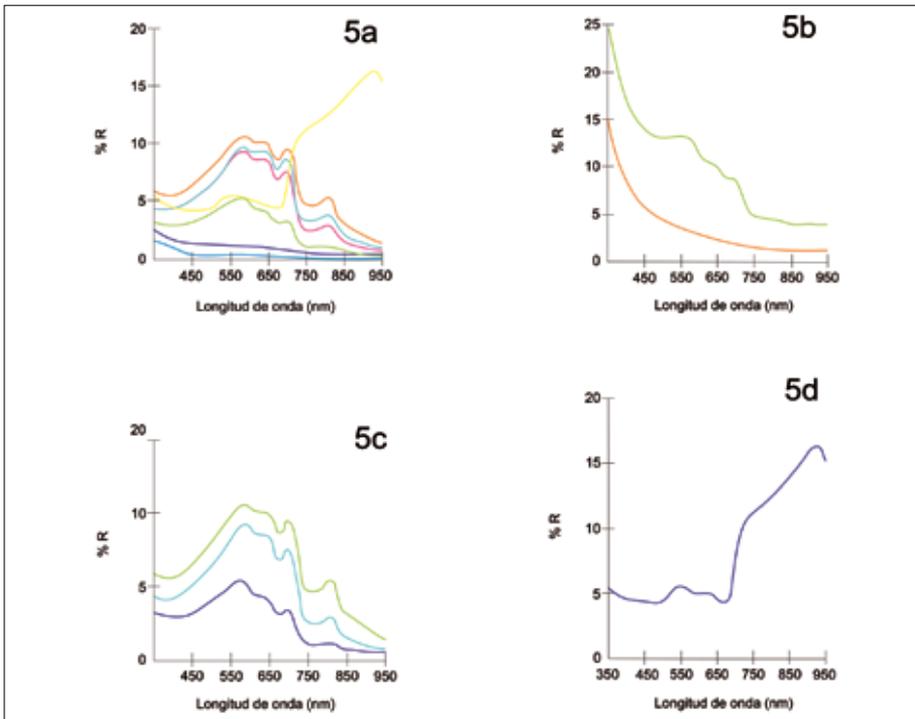


Figura 5 Firmas espectrales de la laguna de Tecocomulco, Hidalgo; a) todos los grupos; b) grupo AT; c) grupo BT; d) grupo C_T

Las firmas espectrales del grupo B_T , integrado por los puntos de muestreo 2, 3 y 4, tienen un comportamiento reflectivo característico de cuerpos de agua someros donde se combina la presencia de fitoplancton y vegetación lagunar (tule, carrizo) y sedimento. La señal reflectiva de cada uno de estos elementos se combina para dar esta respuesta espectral típica. Así, son evidentes tres regiones de absorción importantes: las dos primeras están centradas en 434.5 y 667.5 nm, correspondientes a la absorción del fitoplancton en las regiones azul y roja del EEM, la tercera región está ubicada en el infrarrojo cercano alrededor de los 750 nm, debida básicamente a la absorción del agua. Por otra parte, se observan picos de reflectancia conspicuos en 529.7 y 703.4 nm, el primer pico proviene de la presencia de la clorofila *a*, mientras que el segundo corresponde a la respuesta del sedimento en suspensión en el cuerpo de agua (Figura 5c). La integral reflectiva de los puntos de muestreo 2, 3 y 4 fue de 13.78, 32.99 y 26.32 $mw\ nm\ cm$, ($\mu = 24.36$; $\sigma = 7.96$).

Finalmente, el grupo C_T, que integra al punto de muestreo 5, presenta una respuesta espectral similar al grupo B_T, principalmente en la región visible del espectro, donde se observan picos de absorción en el azul (500 nm) y en el rojo (668 nm) y de reflectancia en el verde (549 nm), típica de la presencia de fitoplancton, aunque atípica en la región del infrarrojo cercano, donde se observa la dominancia de la señal reflectiva del sedimento en suspensión (Figura 5d). Es esta señal la que contribuye de manera importante a la integral de la curva espectral de radiancia, la cual es de 26.03 mw nm⁻¹ cm⁻¹, similar a la media del grupo B_T. En la Tabla 1 se muestran los datos de los picos de absorción, de reflectancia y la integral de las curvas espectrales de los sitios de muestreo del lago de Tecocomulco.

Lago de Xochimilco

Como en el caso anterior, la respuesta reflectiva de los puntos de muestreo del lago de Xochimilco puede dividirse en dos grupos. El primer grupo A_X está con-

Tabla 1. Picos de absorción, de reflectancia y la integral de las curvas espectrales de los puntos de muestreo de la laguna de Tecocomulco

PM	Picos de absorción (nm)	Picos de reflectancia (nm)	Área (mw nm ⁻¹ sr ⁻¹ cm ⁻¹)
1	431.3, 460.9, 716.9	416.9, 648.8, 690.2, 705.9	4.30
2	429.6, 459.2, 490.5, 516.9, 548.2, 587.5, 618.3, 639.2, 669.6, 694.9	474.1, 533.4, 603.7, 653.7, 707.5	13.78
3	441.1, 479.0, 508.7, 538.4, 564.6, 600.5, 637.6, 663.2, 696.5	434.6, 454.6, 493.8, 523.9, 551.8, 574.3, 591.7, 606.9, 652.0, 669.6, 707.9	32.99
4	432.9, 452.6, 495.5, 520.3, 546.6, 571.2, 626.4, 652.1, 669.6, 687.3	418.2, 439.5, 465.8, 508.7, 531.8, 558.1, 640.8, 694.9	26.32
5	426.4, 500.5, 538.4, 564.6, 637.6, 668.0, 691.8	413.3, 512.0, 549.4, 577.7, 653.7, 712.2	26.03
6	457.6, 482.3	470.8	1.78

formado por los puntos 1, 2, 5, 6 y 7 y el segundo grupo B_X por los puntos de muestreo 3 y 4. El subíndice X representa Xochimilco (Figura 6).

Las firmas espectrales de los puntos de muestreo del grupo A_X son similares en cuanto a forma pero diferentes en cuanto a magnitud de reflectancia (Figura 7a). La respuesta espectral presenta características típicas de cuerpos de agua eutróficos (Dekker *et al.*, 1991). Así, es posible observar zonas de absorción en las regiones 400-500 nm (azul) y 600-700 nm (rojo) y de reflectancia en el verde (550 nm) y en el infrarrojo cercano (710 nm). La diferencia en la magnitud de reflectancia se puede asociar tanto a una mayor profundidad en el cuerpo de agua como a una menor concentración volumétrica de vegetación acuática y de fitoplancton.

El análisis por derivadas muestra longitudes de absorción en un rango amplio entre 410 y 460 nm (región azul) con una $\mu = 438.8$ y una $\sigma = 8.23$, y un intervalo similar entre 620 y 670 nm (rojo) con una $\mu = 651.57$ y $\sigma = 18.05$. La



Figura 6. Imagen LANDSAT del lago de Xochimilco, D. F.

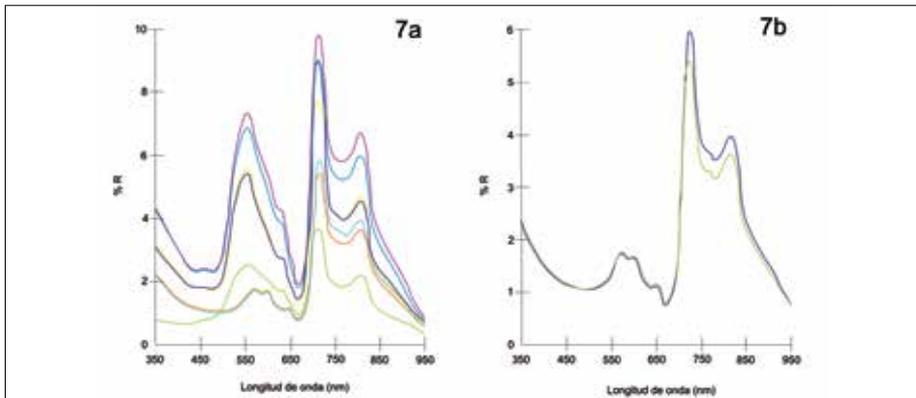


Figura 7. Firmas espectrales de los puntos de muestreo en el lago de Xochimilco; a) grupo A_X ; b) grupo B_X .

Tabla 2 muestra los picos de absorción, reflectancia y la integral espectral para cada uno de los puntos de muestreo.

Asimismo, se observan dos picos de reflectancia conspicuos, el primero de ellos en la región del verde con una $\mu = 565.87$ ($\sigma = 9.28$) y el segundo en el infrarrojo cercano con una $\mu = 711.8$ ($\sigma = 1.32$). El primero corresponde a la reflectancia de la clorofila *a* y el segundo a la alta reflectancia de la vegetación en el infrarrojo cercano.

La media de la integral de energía del grupo A_X fue de $16.6 \text{ mw nm}^{-1}\text{s}^{-1}\text{cm}^{-1}$ ($\sigma = 2.33$), siendo mayor en el punto 5 (19.53) y menor en el punto 7 (14.22).

En el análisis se excluyó el punto de muestreo 2, dado que, aun cuando presenta características espectrales similares a los puntos restantes, difiere en dos aspectos importantes. Primero, la integral de la curva espectral del punto 2 es, aproximadamente, dos veces menor que el resto del grupo y la segunda característica es que la absorción en la región azul es relativamente constante y no presenta inflexiones ni picos de absorción importantes. El pico de absorción en el rojo (647.2 nm) y los de reflectancia en el verde (556.4 nm) e infrarrojo (710.6 nm) son similares a los valores medios del resto del grupo A_X .

Las características espectrales del grupo B_X difieren de manera importante de las del grupo previo, principalmente en la región del verde, donde presentan una zona de absorción centrada en 538.35 nm y un pico de absorción en el rojo centrada en 656.1 nm ($\sigma = 7.3$). Asimismo, presenta máximos locales asociados con la reflectancia localizados en las longitudes de onda 568.7 ($\sigma = 9$), correspon-

Tabla 2. Picos de absorción, de reflectancia y la integral de las curvas espectrales de los puntos de muestreo del lago de Xochimilco

PM	Picos de absorción (nm)	Picos de reflectancia (nm)	Área (mw nm-lsr-lcm-1)
1	428.9, 483.9, 507.1, 535.1, 571.2, 590.7, 615.0, 642.4, 658.4, 683.9	414.9, 441.1, 497.2, 525.2, 579.3, 602.1, 631.2, 710.6	18.24
2	502.8, 543.3, 569.5, 619.9, 647.2, 677.5, 696.5	488.9, 556.4, 580.9, 636.0, 664.8, 710.6	7.26
3	414.4, 535.1, 561.3, 598.0, 663.4, 688.6,	577.7, 672.8, 713.8	8.37
4	405.1, 541.6, 615.1, 648.8, 688.6	423.1, 559.7, 631.2, 668.4, 709.1	7.75
5	406.7, 432.9, 510.4, 546.6, 621.5, 683.9	419.8, 450.9, 558.1, 637.6, 710.6	19.53
6	444.1, 502.1, 540.0, 579.3, 613.4, 640.8, 669.6, 691.8	444.4, 521.9, 556.4, 597.2, 629.6, 656.8, 713.8	14.41
7	449.3, 498.8, 549.9, 616.7, 656.8, 690.2	431.3, 472.4, 526.8, 569.7, 637.6, 669.6, 712.2	14.22

diente al verde, y en 711.45 ($\sigma = 2.35$) en el infrarrojo cercano, como se aprecia en la Figura 7b.

La señal resultante es la contribución de las firmas espectrales de dos elementos ópticos: sustancia amarilla, cuya presencia se aprecia por el intervalo de absorción en el azul y del fitoplancton y vegetación acuática en la región del verde e infrarrojo cercano. Por consiguiente, el grupo B_X puede considerarse como zona de transición y de mezcla de diferentes tipos de agua.

Lago de Zumpango

La respuesta reflectiva de los puntos de muestreo del lago de Zumpango quedó conformada en un grupo único denominado A_Z. El subíndice Z representa Zumpango. La Figura 8 muestra la distribución de los puntos de muestreo en el embalse.

Las firmas espectrales de los puntos de muestreo del grupo A_Z son similares en cuanto a forma pero difieren en la magnitud de la reflectancia (Figura 9).

Como en el caso del grupo A_X , la respuesta espectral presenta características típicas de cuerpos de agua eutróficos (Dekker, 1991). Así, es posible observar zonas de absorción en las regiones 400-500 nm (azul) y 600-700 nm (rojo) y de reflectancia alrededor de los 550 nm (verde) y los 710 nm (infrarrojo cercano). La diferencia en magnitud de la reflectancia se puede asociar tanto a una mayor profundidad en el cuerpo de agua como a una menor concentración volumétrica de vegetación acuática y de fitoplancton.

El análisis por derivadas generó seis longitudes de onda de absorción en un intervalo amplio, destacándose principalmente tres de ellos: en la región azul resalta el pico promedio localizado a $\mu = 437.13$ nm ($\sigma = 1.19$); en la región roja se localizaron los otros dos picos de absorción a $\mu = 632.80$ nm ($\sigma = 1.21$) y $\mu = 683.86$ nm ($\sigma = 1.38$).

Asimismo, se observaron diez picos de reflectancia, sobresaliendo dos de ellos: el primero en la región del verde con una $\mu = 558.76$ nm ($\sigma = 1.86$) y el otro



Figura 8. Imagen LANDSAT del lago de Zumpango, Estado de México y la ubicación de los siete puntos de muestreo.

en el rojo con una $\mu = 645.14 \text{ nm}$ ($\sigma = 1.21$). El primero corresponde a la reflectancia de clorofila *a* y el segundo a la reflectancia de la densa vegetación acuática.

La media de la integral de energía del grupo A_Z fue de $23.09 \text{ mw nm}^{-1} \text{ sr}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ($\sigma = 1.92$), siendo mayor en el punto de muestreo 1 (27.1) y más bajo en el punto de muestreo 5 (21.4).

La señal resultante es la contribución de las firmas espectrales del fitoplancton y de la vegetación acuática en las regiones del verde y del infrarrojo cercano. Esto viene como consecuencia de la trituración del lirio y de su presencia distribuida homogéneamente en todo el embalse (Figura 9). La Tabla 3 muestra los picos de absorción, de reflectancia y la integral de las curvas espectrales de los puntos de muestreo del lago de Zumpango.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en los tres casos presentan similitudes y diferencias. En los tres cuerpos de agua se encuentra la presencia de fitoplancton y/o de vegetación sumergida, principalmente lirio y lentejilla. Por otro lado, las curvas espectrales muestran la presencia de sedimentos en suspensión en el lago de Tecocomulco y en dos puntos de muestreo en el lago de Xochimilco. La combinación de señales de vegetación y sedimento produce una respuesta espectral característica de ambos embalses. El caso de Zumpango es diferente en cuanto presenta una respuesta espectral homogénea en todo el lago. Esta característica es producto de

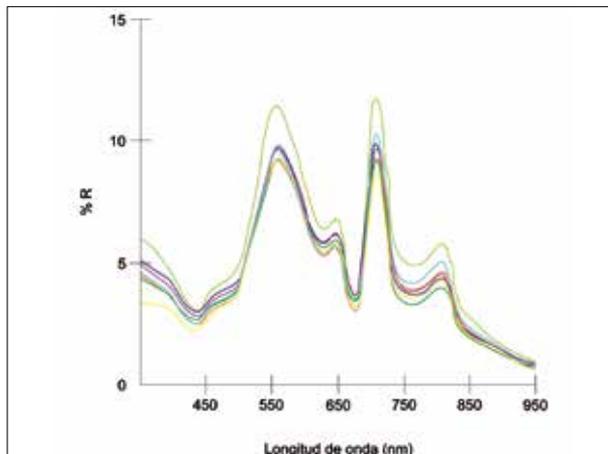


Figura 9. Firmas espectrales de los siete puntos de muestreo del lago de Zumpango.

Tabla 3. Picos de absorción, de reflectancia y la integral del área bajo la curva de los puntos de muestreo del lago de Zumpango

PM	Picos de absorción (nm)	Picos de reflectancia (nm)	Área (mw nm ⁻¹ sr ⁻¹ cm ⁻¹)
1	439.5, 495.5, 526.8, 569.5, 634.4, 687.0	413.3, 428.0, 455.9, 474.1, 488.9, 556.4, 621.5, 644.0, 652.0, 707.5	27.1
2	436.2, 495.5, 526.8, 569.5, 632.8, 683.9	413.3, 426.36, 455.9, 474.1, 488.9, 556.4, 621.5, 644.0, 652.05, 707.5	22.8
3	437.8, 493.9, 526.8, 571.16, 631.2, 683.5	413.3, 455.9, 474.1, 488.9, 558.1, 619.9, 644.0, 652.1, 707.5	21.9
4	436.2, 495.5, 526.8, 572.8, 631.2, 683.9	413.3, 426.36, 455.9, 470.8, 488.9, 559.7, 645.6, 707.5	23.3
5	437.8, 495.5, 528.5, 571.2, 634.4, 683.5	413.3, 457.6, 470.8, 488.9, 559.7, 645.6, 705.9	21.4
6	436.2, 495.5, 528.5, 572.8, 632.8, 682.6	413.3, 426.4, 455.9, 474.1, 488.9, 559.7, 645.6, 705.9	23.3
7	436.2, 493.9, 526.9, 572.8, 632.8, 682.6	413.3, 426.4, 457.6, 474.1, 488.9, 561.3, 647.2, 705.9	21.8

la distribución del lirio triturado y de un proceso de mezcla ocasionado probablemente por vientos.

La coloración del agua y la profundidad de los lagos influyen en la integral de las curvas espectrales. Esto es más evidente en las aguas de Xochimilco donde confluyen distintos ambientes que dan lugar a coloraciones verdosas y tonalidades oscuras en diferentes zonas de los canales. En el primer caso se trata de regiones eutróficas, mientras que en el segundo caso es el resultado de actividades antropogénicas y del tipo de sustrato.

La utilización de sensores remotos hiperespectrales brinda la posibilidad de hacer un análisis detallado del comportamiento espectral de estos cuerpos de agua. Para lograr una mejor caracterización es conveniente contar con información auxiliar que permita hacer inferencias sobre los efectos antropogénicos y de índole natural en los cuerpos de agua bajo estudio.

Referencias

- Aguirre Gómez, R., S. R. Boxall and A. R. Weeks (2001), "Detecting photosynthetic algal pigments in natural populations using a high spectral resolution spectroradiometer", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 22, no. 15, pp. 2867-2884.
- Coutiño, M. (1981), *Evaluación bacteriana en vegetales irrigados con aguas negras en la zona de San Gregorio, Xochimilco*, tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- Dekker, A. G., T. J. Malthus and E. Seyhan (1991), "Quantitative modeling of inland water quality for high-resolution MSS systems", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 29, no. 1, pp. 89-95.
- De la Lanza Espino, G. and G. Gómez Rodríguez (2005), "Analysis of the short-term geo-environmental evolution of an endorreic basin through satellite images: the case of Tecocomulco Lake, Mexico", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 58, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 66-79.
- Dugan, P. J. (ed.; 1992), *Conservación de humedales. Un análisis de temas de actualidad y acciones necesarias*, UICN, Gland.
- García, E. (1988), *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*, offset Larrios, 4ª ed., México.
- Gordon, H. R. (1985), "Ship perturbations of irradiance measurements at sea, 1. Monte Carlo simulations", *Applied Optics*, vol. 24(23), pp. 4172-4182.
- INEGI (1998), *Carta Hidrológica de Aguas Superficiales*, escala 1:250 000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI (2001), *Cuaderno Estadístico Delegacional, Tlalpan*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- Jerlov, N. G. (1976), *Marine Optics*, Elsevier Scientific, 2nd ed., New York.
- Jiménez, O. E. (1989), *Mesomicroclima de la Ciudad de México*, UNAM, México.
- Kirk, J. T. O. (1983), *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*, 2nd ed., University Press, Cambridge.
- Lot, H. A. and A. Novelo (1978), *Lago de Tecocomulco, Hidalgo*, Sociedad Botánica Mexicana, México.
- Martínez-Arroyo, A. and E. Jáuregui (2000), "On the environmental role of urban lakes in Mexico City", *Urban Ecosystems*, vol. 4, no. 2 (April 2000), pp. 145-166.
- Milton, E. J. (1987), "Principles of field spectroscopy", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 8, pp. 1807-1827.
- Mooser, F., A. Montiel y A. Zúñiga (1996), *Nuevo mapa geológico de las cuencas de México. Toluca y Puebla: estratigrafía, tectónica regional y aspectos geotérmicos*, Comisión Federal de Electricidad, México.
- Morel, A. and L. Prieur (1977), "Analysis of variations in ocean color", *Limnology and Oceanography*, vol. 22(4), pp. 709-722.

- Prol-Ledesma, R. M., E. M. Uribe-Alcántara and O. Díaz-Molina (2002), "Use of cartographic data and Landsat TM images to determine land use change in the vicinity of Mexico City", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 23, no. 9 (May 10, 2002), pp. 1927-1933.
- Schutt, J. B., B. N. Holben, L. M. Shai and J. H. Henninger (1981), "Reflectivity of TFE –a washable surface – compared with that of BaSO₄", *Applied Optics*, vol. 20, pp. 2033-2035.
- Shifrin, K. S. (1988), *Physical optics of ocean water*, American Institute of Physics (Translation Series), New York.
- Swain, P. H. and S. Davis (1978), *Remote sensing: the quantitative approach*, McGraw-Hill, New York.
- Weidner, D. L. and J. J. Hsia (1981), "Reflection properties of pressed polytetrafluorethylene powder", *Journal of the Optical Society of America*, vol. 71, pp. 856-861.

Capítulo 4. Análisis espectral del lago de Chalco a través de imágenes satelitales

Olivia Salmerón García

Laboratorio de Análisis Geoespacial, Instituto de Geografía
Universidad Nacional Autónoma de México

Bosquejo histórico

El lago de Chalco es uno de los remanentes del gran Lago que existía en la época prehispánica. Conforme crecieron los asentamientos humanos y se crearon canales para controlar las inundaciones en la antigua Tenochtitlan, el Gran Lago del Valle de México se fue desecando. Actualmente sólo quedan algunos remanentes como el lago de Zumpango, el lago de Guadalupe, el lago de Xochimilco y el lago de Chalco.

Anteriormente, en el siglo XVI, en el lago de Chalco se producía el mejor maíz de la época debido a las propiedades del agua y a las técnicas utilizadas por los chalcos por lo que Chalco se convirtió en una provincia muy productiva y tributaria de los mexicas (Gobierno del Estado de México, 1999). En la colonia se reparten las tierras conquistadas, suceso que dura alrededor de tres siglos y el lago de Chalco se convierte en un importante puerto lacustre, donde atracaban trajineras que llevaban verduras y semillas hacia la Ciudad de México.

En el siglo XIX se planearon los primeros proyectos, de la época independiente, para desecar el lago de Chalco que en 1861 tenía 10 448 ha (Beltrán, 1998). Los fines que perseguían estas acciones eran dos, el primero consistió en eliminar las constantes inundaciones que sufrían los habitantes de la ciudad y el sur de la Cuenca, y el segundo fue obtener tierras de buena calidad para el cultivo. El objetivo del gobierno de mejorar las actividades agrícolas coincidió con los reclamos de los empresarios como Remigio e Íñigo Noriega Lazo, hacendados españoles, quienes fueron los primeros en hacer obras hidráulicas para desecar el Lago (*Ibid.*).

Para 1895 el lago tenía una extensión de 9 500 ha y una profundidad alrededor de 1 130 m, y contenía 35 millones de metros cúbicos de agua, sin embargo,

el 30 de julio del mismo año, el gobierno del Estado de México aprobó un proyecto a los hermanos Noriega Lazo para desecar completamente el lago.

La Compañía Agrícola de Xico construyó un sistema de canales que se aprovecharon como vías de comunicación. Uno de ellos destinado a conducir las aguas del lago de Chalco al de Texcoco, con una extensión de 16 km. Otro, con una extensión de 18 km por 12 m de ancho, servía para llevar el agua de los mantiales situados en la parte sur de la ciénaga de Chalco, así como las corrientes de aguas provenientes de la Sierra Nevada y del Río Ameca, hacia el Lago de Xochimilco (*Ibid.*). En 1907, el gobierno estatal toma las riendas sobre las obras de desecación y canalización marcando el fin de las acciones particulares de los hermanos Noriega.

Actualmente, el remanente del lago de Chalco se encuentra en peligro de extinción; por un lado debido a los fraccionamientos ilegales de las tierras circundantes, al crecimiento descontrolado de la población y a la falta de capacidad de las autoridades para crear normas que ayuden a la conservación de la zona que fue declarada, durante la presidencia de Miguel de la Madrid, Zona de Protección Ecológica en 1986. Por otra parte, la sobreexplotación de los mantos acuíferos ha acarreado un problema mayor, al no dejar que éstos se recarguen, lo que trae como consecuencia el hundimiento de la zona y daños a la infraestructura.

Área en estudio

El lago de Chalco es uno de los remanentes del sistema lacustre de la Cuenca del Valle de México, conformado en su momento por los lagos de Zumpango y Xaltocan en la parte norte, al centro el lago de Texcoco y al sur Xochimilco y Chalco. Caballero (1997) indica que a lo largo de la historia, Chalco ha sufrido cambios en su extensión y en su composición química. Entre los años ca. 34000 y 31000 Antes del Presente (A.P.) fue un lago salino-alcalino, luego entre ca. 23000 y 18500 A.P. fue un lago de aguas dulces, desde entonces tuvo fluctuaciones entre aguas dulces y saladas hasta ca. 14500 A.P. El lago de Chalco está situado entre la Sierra Nevada al este, la Sierra de Santa Catarina al norte y la Sierra de Chichinautzin al sur (Figura 1).

Un estudio de Bouvier *et al.* (1993) sobre la cuenca de Chalco indica que anteriormente el lago del Chalco tenía una superficie aproximada de 100 km² y una profundidad media de 2 m. Actualmente se localiza en la delegación Tláhuac (D.F.) y el municipio de Valle de Chalco (Estado de México) y es conocido como los “Humedales de Tláhuac”. Se trata de un lago muy contaminado por el



Figura 1. Área en estudio.

aporte de aguas negras, aunque también recibe aguas subterráneas provenientes de las Sierra Nevada y de las precipitaciones.

Antecedentes

Imágenes Landsat TM

El satélite Landsat 5 fue puesto en órbita el 1 de marzo de 1984 llevando a bordo el sensor Thematic Mapper (TM), diseñado para el monitoreo de la superficie terrestre a escala regional. Entre sus características más importantes está la frecuencia con la que puede ver un mismo punto, la cual es de 16 días, y el detalle más pequeño que puede distinguir es de 30 m. En la Tabla 1, se describen sus bandas espectrales y algunas de sus aplicaciones. Por su parte, la Figura 2 muestra las bandas espectrales del Landsat y Spot así como la firma espectral del suelo, vegetación verde y agua pura en términos de porcentaje de reflectancia. Como se puede observar, el agua refleja menos del 10% entre la porción azul-verde del espectro electromagnético y hacia el infrarrojo cercano su reflectancia es de cero.

Tabla 1. Landsat TM, bandas espectrales

Banda	Long. onda	Aplicaciones
1 azul-verde	0.45- 0.52 m	Discriminación suelo/vegetación; batimetría/ costas; identificación de características urbano/ culturales
2 verde	0.52- 0.60 m	Identificación de vegetación verde (pico de reflectancia); características urbano/culturales
3 rojo	0.63- 0.69 m	Discriminación de vegetación <i>vs.</i> No-vegetación y algunas especies (absorción de clorofila); características urbano/culturales
4 Infrarrojo Cercano	0.76-0.90 m	Identificación de plantas y vegetales, salud y biomasa; delineación de cuerpos de agua; humedad del suelo
5 Infrarrojo Medio	1.55-1.75 m	Suelos y vegetación húmedos; discriminación de áreas cubiertas por nubes o nieve
7 Infrarrojo Medio	2.08-2.35	Discriminación de tipos de rocas y minerales; contenido de humedad en la vegetación
6 Infrarrojo Térmico	10.4-12.5	Discriminación de vegetación estresada y suelo húmedo; energía térmica

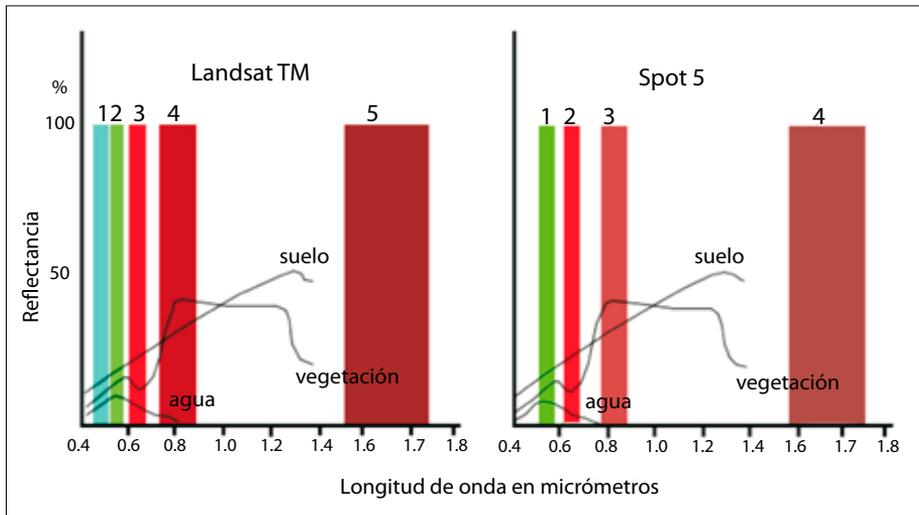


Figura 2. Bandas del Landsat y Spot, y las firmas espectrales del suelo, agua pura y vegetación (modificada de: <http://www.eduspace.esa.int/subtopic/images>).

Imágenes SPOT 5

El satélite SPOT (Système Pour l'Observation de la Terre) lleva a bordo el sensor Haut Resolution Visible (HRV), diseñado para aplicaciones a gran escala, por ejemplo, estudios urbanos y de recursos a escala local, debido a que el tamaño mínimo que el sensor puede distinguir es de 10 m. Su resolución temporal, es decir, el tiempo que tarda en pasar por un mismo punto, es de 26 días. En la Tabla 2 se describen sus características espectrales y aplicaciones.

Características espectrales del agua y vegetación acuática

La firma espectral de un objeto es la curva que representa su porcentaje de reflectividad o de absorción. En el caso del agua pura, es sabido que su porcentaje de reflectividad es bajo en las longitudes de onda visibles y se vuelve cero en la parte del infrarrojo cercano, como se observa en la Figura 2. Las longitudes de onda larga en el visible, es decir, las que corresponden al color rojo e infrarrojo cercano, son mayormente absorbidas que las longitudes cortas del visible, o sea, aquéllas que se ubican en el azul. Es por esto que el agua comúnmente se ve en tonos azules-verdes en la parte visible del espectro electromagnético o de color negro en el infrarrojo cercano.

Pero si el agua contiene materiales suspendidos, fitoplancton, vegetación acuática o subacuática, o materia orgánica puede tener diferentes tonalidades. En presencia de sedimentos suspendidos en el agua, ésta tendrá mayor reflectividad y brillantez. Por su parte, la clorofila *a* contenida en las algas absorbe las longitudes de onda en el azul y refleja en el verde dando una coloración verdosa al agua. Un alto contenido de materia orgánica proveniente de aguas negras la hará verse en

Tabla 2. SPOT, bandas espectrales

Banda	Long. onda	Aplicaciones
1 verde	0.50- 0.59 m	Identificación de vegetación verde (pico de reflectancia); características urbano/culturales
2 rojo	0.61- 0.68 m	Discriminación de vegetación <i>vs.</i> No-vegetación y algunas especies (absorción de clorofila); características urbano/culturales
3 Infrarrojo Cercano	0.78-0.89 m	Identificación de plantas y vegetales, salud y biomasa; delineación de cuerpos de agua; humedad del suelo
4 Infrarrojo Medio	1.58-1.75 m	Suelos y vegetación húmedos; discriminación de áreas cubiertas por nubes o nieve

tonos muy oscuros y, por último, cuando hay presencia de materia orgánica asociada a vegetación en proceso de putrefacción, conocida como sustancia amarilla (*Yellow substance o gelbstoff*), el agua absorbe más en el azul que en el amarillo, de ahí que presente coloraciones amarillas. La topografía de la superficie del agua también afecta la forma como la energía es reflejada y por lo tanto influye en su color. El agua se comporta diferente en el infrarrojo térmico debido a que el sensor capta la energía calorífica que ésta emite y por lo tanto la curva que llega a cero en longitudes de onda alrededor de 0.8 micrómetros, se incrementa hasta alcanzar un máximo alrededor de los 10 micrómetros.

La Figura 3 representa la firma espectral de aguas dominadas por fitoplancton (aguas caso 1), la Figura 4 muestra la firma espectral del agua con sustancia amarilla (aguas caso 2) y la Figura 5 aguas dominadas por sedimentos (aguas caso 2; Aguirre, 2002).

Metodología

Imágenes satelitales

Se obtuvieron dos imágenes satelitales, SPOT 5 de diciembre de 2004 y LANDSAT TM de 2000. Esta última se obtuvo de la página Global Land Cover Facility, la

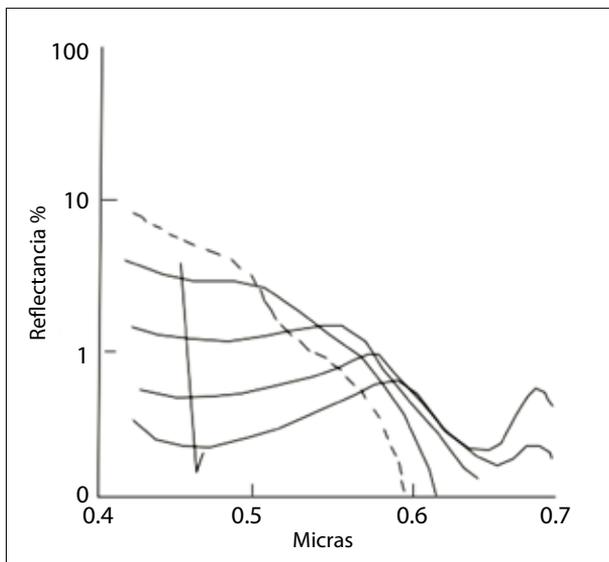


Figura 3. Aguas caso 1. Dominadas por fitoplancton y sus productos de degradación (sustancia amarilla). La flecha indica como cambia el perfil al aumentar la clorofila. La línea punteada es agua pura [modificada de: <http://www.profc.udec.cl/~gabriel/tutoriales/curso/cap08-Color.PDF>].

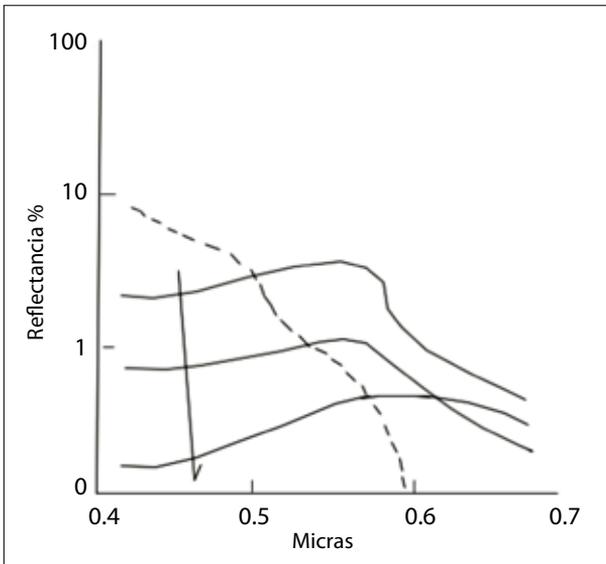


Figura 4. Aguas caso 2. Dominadas por sustancia amarilla. La flecha indica el aumento en la concentración de dicha sustancia. La línea punteada es la firma espectral del agua pura [modificada de: <http://www.profc.udec.cl/~gabriel/tutoriales/curso/cap08-Color.PDF>].

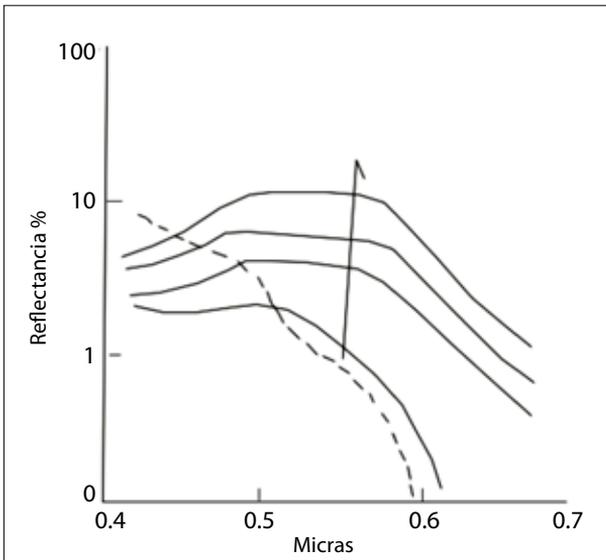


Figura 5. Águas caso 2. Dominadas por sedimento. La flecha indica el aumento en la carga de sedimento. La línea punteada es la firma espectral del agua pura [modificada de: <http://www.profc.udec.cl/~gabriel/tutoriales/curso/cap08-Color.PDF>].

cual concentra y recopila los datos y productos enviados por sensores remotos. La zona en estudio correspondiente al lago de Chalco está comprendida en el path26 – row47, mientras que su ubicación está dada por las coordenadas geográficas: 19 °16' 21" N y 98° 59'19" W.

Procesamiento de imágenes

Se aplicó un recorte a ambas imágenes, utilizando el programa ENVI©, para seleccionar solamente el lago de Chalco.

Se hicieron compuestos RGB, Figura 6, para resaltar sedimentos, materia orgánica, aguas negras y/o fitoplancton utilizando las bandas 321 de SPOT y 432 de LANDSAT procurando que las longitudes de ondas de las bandas fueran semejantes entre ambos satélites.

Se graficaron las firmas espectrales de cada una de las cuatro regiones que se aprecian en los compuestos RGB (Figuras 7 y 8).

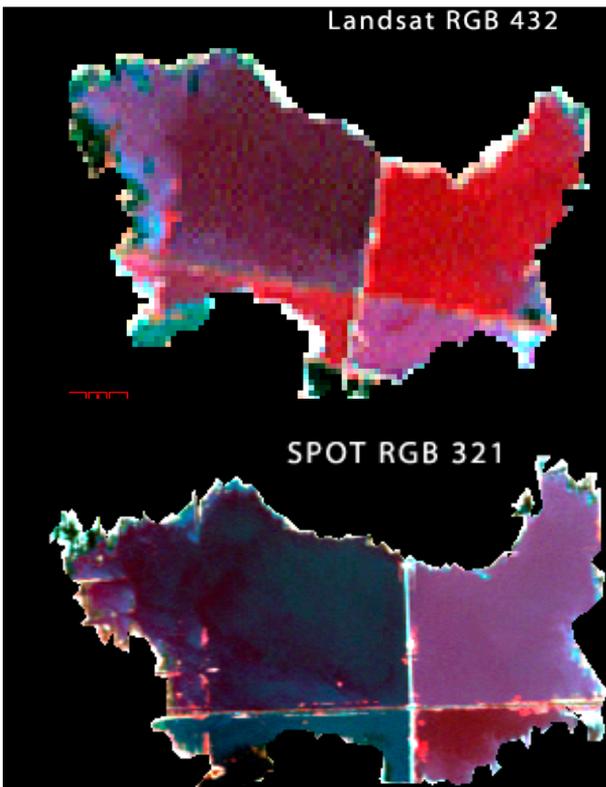


Figura 6. Compuestos RGB.

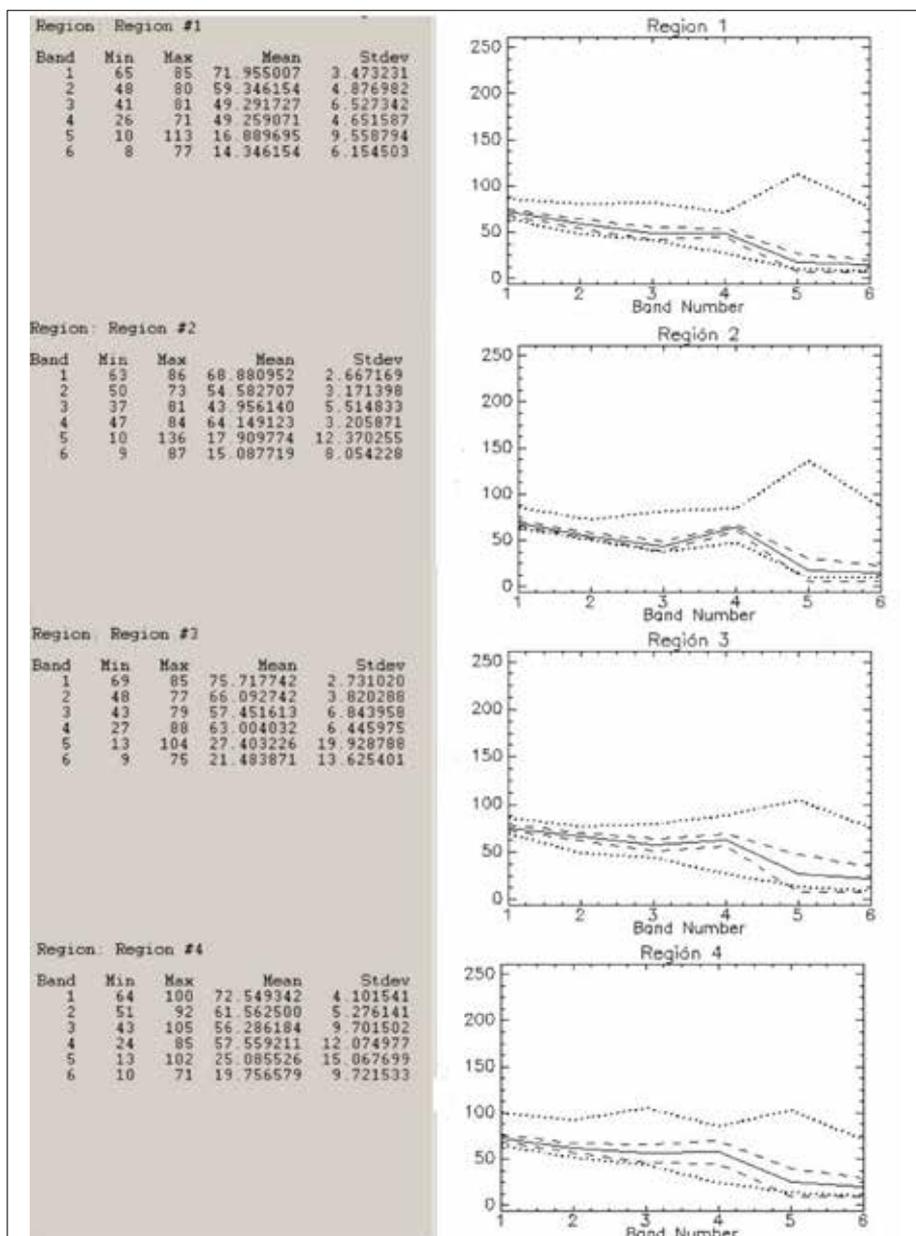


Figura 7. Firmas espectrales por regiones derivadas del Landsat. La línea sólida representa el promedio, las líneas cortadas la desviación estándar y las punteadas el mínimo y máximo.

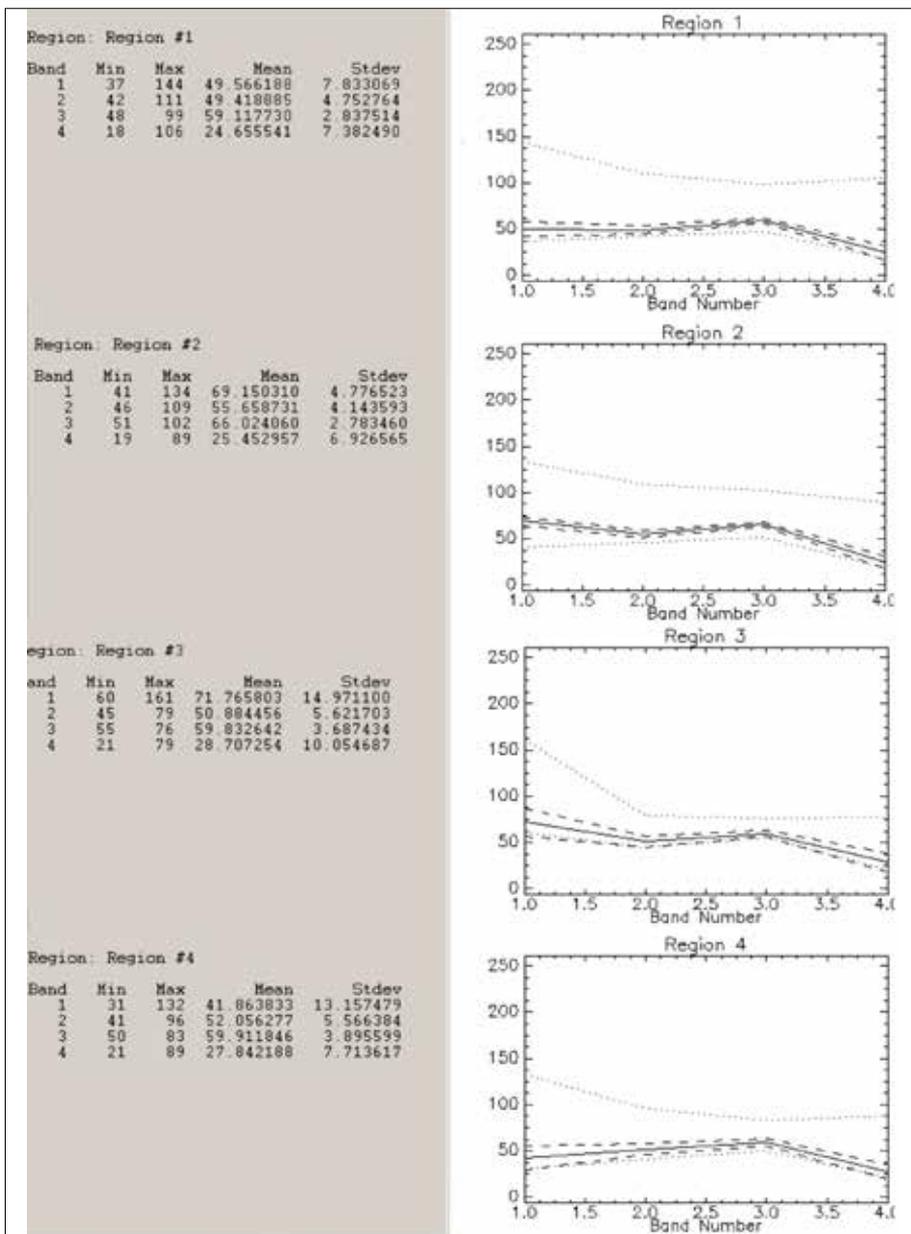


Figura 8. Firmas espectrales por regiones derivadas del Spot. La línea sólida representa el promedio, las líneas cortadas la desviación estándar y las punteadas el mínimo y máximo.

Se calculó el índice de vegetación (NDVI) con las bandas 3 y 4 del Landsat así como con las bandas 2 y 3 del SPOT (Tabla 3).

El análisis de los compuestos RGB, Landsat y Spot, permite diferenciar cuatro regiones dentro del lago de Chalco, las cuales se explican, en los párrafos siguientes, por el comportamiento espectral reflejado en los niveles digitales (ND).

Resultados y Discusión

Compuesto RGB 432 Landsat

La región 1, Figura 6, muestra tonos muy oscuros que se pueden relacionar con aguas negras o bien, una mayor profundidad del lago. La Figura 4 muestra cómo al incrementarse la materia orgánica proveniente de aguas negras (Bouvier, 1993), el agua absorbe en gran medida la energía que recibe, lo cual podría explicar los bajos niveles digitales en la banda 4 por ausencia de fitoplancton y la coloración oscura en esta región.

La región 2 tiene una coloración roja que indica altas concentraciones de fitoplancton, 64.15 Niveles Digitales (ND) en la banda 4 (0.76-0.90 micrómetros). Por su parte, el NDVI refuerza la presencia del fitoplancton ya que muestra el valor promedio más alto para esta región.

En la orilla de la región 3, los tonos amarillos sugieren presencia de sedimentos suspendidos. De acuerdo con la Figura 5, la reflectancia aumenta en las longitudes de onda de 0.5 a 0.6 micrómetros conforme aumenta la presencia de sedimentos, de ahí que en la banda 2 de Landsat (0.52- 0.60 micrómetros) se observen valores altos, alrededor de 66.09 ND.

Tabla 3.

NDVI	Mínimo		Máximo		Promedio		Desv. estándar	
	Landsat	Spot	Landsat	Spot	Landsat	Spot	Landsat	Spot
Región 1	-0.315	-0.075	0.179	0.165	0.001	0.090	0.069	0.025
Región 2	-0.152	-0.070	0.269	0.118	0.188	0.085	0.054	0.018
Región 3	-0.454	-0.040	0.163	0.125	0.046	0.082	0.064	0.025
Región 4	-0.379	-0.074	0.207	0.145	0.005	0.071	0.153	0.024

La región 4 tiene una coloración roja en la parte más cercana al centro del lago, indicando presencia de fitoplancton, similar a la región 2, mientras que hacia la orilla va cambiando a tonos azules claros que indican menor cantidad de fitoplancton así como una menor profundidad del Lago.

Compuesto RGB 321 Spot

El compuesto RGB321 de Spot, Figura 6, a pesar de estar basado en longitudes de onda similares a las bandas 432 de Landsat, presenta colores diferentes. En este compuesto sólo la región 3 tiene tonos rojos que indican altas concentraciones de fitoplancton. Mientras que la región 2 muestra un color violeta y por lo tanto es muy diferente al comportamiento espectral de esta región en el compuesto Landsat.

La región 1 tiene colores muy oscuros con valores promedio muy bajos en la banda 4 (1.58-1.75 micrómetros) de 24.65 ND, por lo tanto, no hay presencia importante de fitoplancton. Asimismo, hay valores bajos en el resto de las bandas que indican un incremento de sustancia amarilla y de materia orgánica proveniente de aguas negras.

La región 2 aparece con tonos violetas, la banda 4 (1.58-1.75 micrómetros) muestra los valores promedio más bajos, 25.45 ND, mientras que la banda 1 (0.50- 0.59 micrómetros) los más altos, 69.15 ND. Este comportamiento en la banda 1, coincide claramente con la Figura 5 que muestra la firma espectral de aguas dominadas por sedimento. El resto de las bandas muestra valores ligeramente más elevados que la región 1, lo cual podría indicar un menor aporte de aguas negras.

La región 3 muestra tonos rojos y valores promedio de 59.83 ND en la banda 4 (1.58-1.75 micrómetros), más elevados que en las regiones anteriores, lo cual indica presencia de fitoplancton además de sedimentos puesto que los valores más elevados están en la banda 1 (0.50- 0.59 micrómetros), los cuales se relacionan con la presencia de sedimentos

La región 4 tiene tonos azules y valores promedio bajos en la banda 4 (1.58-1.75 micrómetros), 27.84 ND, el resto de las bandas tiene valores bajos similares a los de la región 1, lo cual sugiere presencia de sustancia amarilla y materia orgánica.

En la Tabla 4 se resume el análisis de las regiones y se puede observar que ha habido cambios en la composición el agua del 2000 al 2004, imágenes Landsat y Spot, respectivamente. De manera general los cambios muestran una degradación de la calidad del agua puesto que en el compuesto Landsat sólo la región 1 resultó con materia orgánica, mientras que en el compuesto Spot las regiones 1 y 4 muestran materia orgánica y presencia de sustancia amarilla, además de que la región 3 cambió de fitoplancton a sedimentos.

Por último, se midió el área de cada una de las regiones. La diferencia en su extensión de 2000 a 2004 es mínima y al sumarlas se observa que el área del lago de Chalco para 2004 es de 2.6568 km², con un incremento de 0.2018 km² con respecto al 2000 (Tabla 5).

Conclusiones

El lago de Chalco no es homogéneo; está dividido por una avenida y un camino de terracería que se cruzan dentro de este cuerpo de agua, formándose cuatro regiones. Las características de éstas no son las mismas debido a que las imágenes sugieren la presencia de distintos materiales: fitoplancton, materia orgánica, sedimentos o sustancia amarilla. El contenido de estos materiales no es siempre el mismo, como se observa en el cambio de la respuesta espectral de cada región. Por otra parte, el área que ocupa el lago aumentó ligeramente, 0.2018 km², del 2000 al 2004.

Tabla 4. Cambio en la composición del agua en cada región

	RGB421 Landsat	RGB 321 Spot
Región 1	Materia orgánica	Sustancia amarilla y materia orgánica
Región 2	Fitoplancton	Sedimentos
Región 3	Sedimentos	Fitoplancton y sedimentos
Región 4	Fitoplancton	Sustancia amarilla y materia orgánica

Tabla 5. Superficie en cada una de las regiones

Extensión del lago	Landsat 2000 (km ²)	Spot 2004 (km ²)	Diferencia (km ²)
Región 1	1.240	1.420	0.180
Región 2	0.718 200	0.789 700	0.0715
Región 3	0.223 200	0.193 000	-0.0302
Región 4	0.273 600	0.254 100	-0.0195
Total	2.455	2.6568	0.2018

Agradecimientos

Alumnos de servicio social de la Licenciatura en Geografía: Joel Everardo Baca Sánchez y Alfredo Nieto García.

Referencias

- Aguirre Gómez, R. (2002), *Los mares mexicanos a través de la percepción remota*, Temas Selectos de Geografía de México (III.1), Instituto de Geografía-UNAM, Plaza y Valdés, México.
- Beltrán, B. (1998), *La desecación del Lago (ciénega) de Chalco*, Colección de documentos de investigación. Colegio Mexiquense, A. C. [<http://www.cmq.edu.mx/docinvest/document/DI29141.pdf>].
- Bouvier, C., E. Didon, H. Niedzielski y R. Huízar (1993), “Hidrología e Hidrogeología en la cuenca de Chalco. Descripción y Perspectivas”, *ContactoS*, 10, 19-29, p. 19 [http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/b_fdi_35-36/41387.pdf].
- Caballero-Miranda, M. E. (1997), “Reconstrucción paleolimnológica del Lago de Chalco, México, durante el último máximo glaciario – El registro de diatomeas entre 34000 y 15000 años A.P.”, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 14, núm. 1, Instituto de Geología, UNAM, México, pp. 91-100.
- Gobierno del Estado de México, *Monografía Municipal de Chalco, Toluca México 1999*, p. 150 [<http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/mexico/mpios/15025a.htm>].
- Global Land Cover Facility (GLCF; 2004), NASA Landsat Program, 1972, Landsat TM+ scene L71008058_05820031026, GeoVover, USGS, Sioux Falls, Dec 16 14:01:04, [www.landcover.org].
- Yuras, G., *Introducción a la percepción remota del océano*, [<http://www.profc.udec.cl/~gabriel/tutoriales/curso/cap08-Color.PDF>].

Capítulo 5. Laguna de Tecocomulco y sus variables climáticas, hidrológicas y de vegetación a través de imágenes de satélite

Gabriela Gómez Rodríguez

Laboratorio de Análisis Geoespacial, Instituto de Geografía
Universidad Nacional Autónoma de México

Guadalupe de la Lanza Espino

Laboratorio de Hidrobiología, Instituto de Biología
Universidad Nacional Autónoma de México

Introducción

Los lagos y lagunas que constituían la Cuenca del Valle de México (entre ellos Chalco, Xochimilco, Xaltocan y Zumpango) han sido motivo de diversos estudios; sin embargo, la laguna de Tecocomulco, perteneciente a la misma Cuenca, sólo recientemente. Esta laguna es considerada como relictas, conservándose en forma perenne comparada con los lagos Apan y Tochac, ya desaparecidos (Caballero *et al.*, 2005).

La laguna de Tecocomulco ha experimentado fuertes cambios, no sólo entre épocas geológicas sino también en periodos cortos interanuales, con variaciones significativas en su limnología, consecuencia del clima y recientemente de la intensidad de las actividades humanas como el manejo hidráulico y la agricultura, que tienden a reducir la superficie lacustre. Contrariamente a esto, la laguna puede experimentar incrementos en su superficie debido a que al azolverse por la gran deforestación de la subcuenca, a una misma tasa de lluvia, la cobertura aumenta perdiendo profundidad

Dada la deforestación de la subcuenca, la erosión es alta; según Ruiz y Huízar (2005), la pérdida de suelo en la subcuenca es de aproximadamente 40 mil toneladas y si la erosión-depositación continúa en una proporción de 3.4 cm m⁻² año⁻¹ en un lapso de 18 años, la laguna de Tecocomulco pudiera azolverse completamente.

Lot y Novelo (1978) señalan que se pueden establecer diferentes asociaciones vegetales según la profundidad. Lot (2005) incorpora también la topografía y determina al tular como hidrófila emergente principal de la fisonomía lacustre y como parte importante en áreas claramente perturbadas por el hombre, manchones de *Typha latifolia* (tule) y *Schoenoplectus americanus* (tullillo). Caballero *et al.* (1999 y 2005) informan que en zonas de cobertura permanente existe tule en forma densa (*Schoenoplectus californicus*), en áreas abiertas, entre el tular, hay *Najas guadalupensis* (pasto de agua), *Potamogeton foliosus* (ocoshal de agua), *P. pectinatus* (grama); como flotadoras están *Lemna gibba* (lenteja); y *Wolffia papulifera* (flor de agua); en la zona litoral *Polygonum punctatum*, *P. lapathifolium* y *Lilaea subulata* (cebollaja); así como en áreas inundadas, estacionalmente *Azolla carolineana* (chichicastle).

En la parte norte de la laguna, Granados *et al.* (2005) señalan bosques con asociaciones vegetales de pino-encino (*Pinus teocote* – *Quercus crassifolia*), pino-abeto (*Pinus patula* – *Abies religiosa*) y junipero-encino (*Juniperus flaccida* – *Quercus crassipes*).

Con objeto de determinar las variaciones de corto plazo en el espejo de agua, en la distribución de la vegetación y los cambios en el uso del suelo, De la Lanza y Gómez (2005), utilizaron imágenes de satélite (LANSAT) tanto en la época de lluvias como en la de sequías de diferentes años (1975, 1985, 1990, 2001 y 2002), con integración de los resultados a través del GIS ArcView 3.2. Adicionalmente determinaron, en aproximadamente tres décadas (de 1976 a 2000), un incremento del 9.3% en las actividades agrícolas, una amplia variación en la superficie lacustre y un área de vegetación sin cambio del 21.2%

Dado que la laguna de Tecocomulco experimenta grandes cambios en su superficie con amplias áreas desecadas y cierto tipo de vegetación asociada al nivel de agua, es de esperarse cambien interanualmente la distribución de las hidrófilas emergentes. Por lo anterior, este trabajo tiene como objetivo determinar dichos cambios en aproximadamente tres décadas (de 1985 a 2002), empleando imágenes de satélite.

Área en estudio

La laguna de Tecocomulco se encuentra en el estado de Hidalgo, al noroeste de la gran Cuenca del Valle de México (Figura 1), representando el 5.49% del área total, con una subcuenca de 564 km² (CNA, 2000), entre las coordenadas 19° 42' 13.7" - 19° 59' 30" N y 98° 11' 46.2" - 98° 27' 30" W (Figura 1). Es de

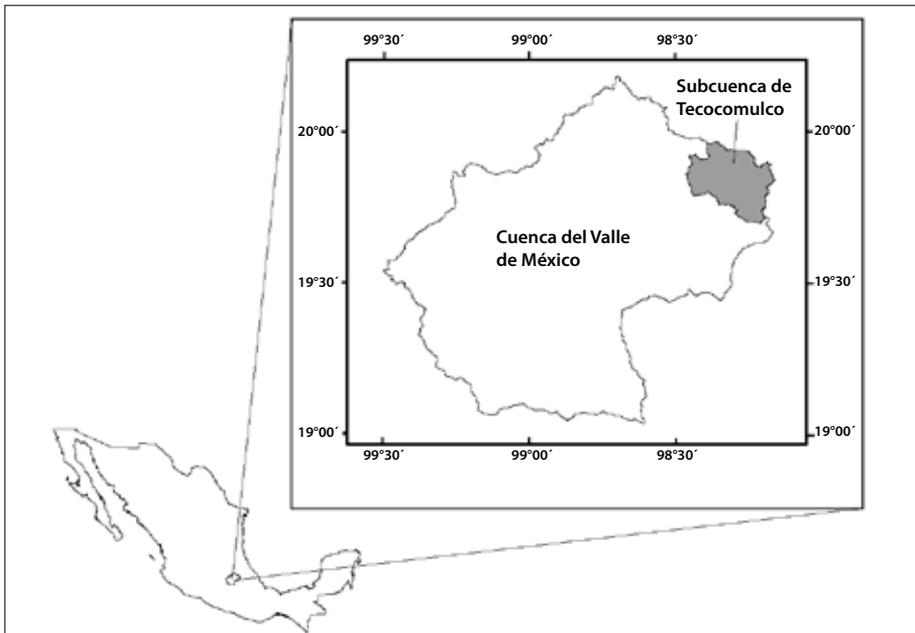


Figura 1. Ubicación de la zona en estudio.

tipo endorreico, con diversos aportes fluviales (ríos Cuatlaco, Tepozán, Toronjil y Canoas) que no son caudalosos debido a la baja precipitación, alta evaporación y alta permeabilidad; sin embargo, los dos primeros son permanentes. Según Huízar y Ruiz (2005), existen en la laguna manantiales de los cuales los de mayor caudal son: Alcantarillas, Reposan, Rancho Nuevo, Piedra Ancha y el Mexicano, entre otros, que según la época del año disminuyen, como en la temporada de sequía. Señalan también que es una laguna somera con 70 cm promedio de profundidad, de extensión variable pudiendo alcanzar 27 km², aunque De la Lanza y Gómez (2005) consideran que puede llegar a tener una superficie hasta de 35 km², consecuencia de máximas precipitaciones como la de 2001, coincidente con el fenómeno de La Niña de moderado a fuerte.

El origen de la laguna es volcánico tectónico, está rodeada por fallas que corren en dirección NE-SW (García y Macías, 2005). Se encuentra cercada por una red de canales construidos en la planicie para evitar la inundación de terrenos para el cultivo (Huízar y Ruiz, 2005).

Presenta un clima templado subhúmedo con cuatro subtipos locales, con lluvias en el verano; según Caballero *et al.* (1999) existen áreas en donde se re-

gistra un clima semi-árido. La precipitación media anual es de 701 mm con una distribución espacial altitudinal y una evapotranspiración máxima en mayo (Huizar y Ruiz, 2005).

Marco teórico

Firma espectral de la vegetación. Se refiere a la forma específica en que un determinado objeto responde a las diferentes longitudes de onda de la energía electromagnética que recibe. Dicha respuesta se da en forma de energía reflejada o emitida y será diferente de acuerdo con las características físicas y químicas del objeto en cuestión (Jensen, 1986).

El espectro electromagnético se divide, de acuerdo con la longitud existente entre dos ondas consecutivas (λ), y va desde los rayos gamma (λ del orden de 3×10^9) hasta las ondas de radio (λ del orden de metros) pasando por el ultravioleta, visible e infrarrojo (Harris, 1987).

En la superficie de la Tierra, la energía electromagnética proveniente del Sol, es reflejada con diferentes características por muy diversos objetos, lo cual se aprecia por ejemplo, en el espectro visible, como el color de los objetos (Chuvieco, 1991). De esta forma se observa que la vegetación aparece verde, lo cual significa una reflectancia mayor en esa zona del espectro.

Sin embargo, un análisis más amplio de la firma espectral típica de la vegetación (Figura 2), señala que si nuestra visión abarcará una franja más amplia del espectro, la vegetación no sería verde sino infrarroja.

En el espectro visible, la vegetación tiene una baja reflectancia debido a la absorción de energía por la clorofila contenida en las células del interior de la hoja, que están dispuestas en una formación lineal y que son conocidas como parénquima en empalizada. Alrededor de los $0.5 \mu\text{m}$ la absorción es menor y esto le da el color verde. Otros pigmentos contenidos en la hoja, como xantofilas y carotenos, también absorben energía alrededor de los $0.445 \mu\text{m}$.

Por el contrario, en la porción del espectro conocida como infrarrojo cercano (0.7 a $1.3 \mu\text{m}$), la reflectancia es elevada. Harris (1987) explica que en la capa esponjosa del interior de la hoja, donde hay gran cantidad de cavidades, se produce una importante dispersión de la energía incidente. Al acercarnos al infrarrojo medio, se ve una mayor absorción de la energía, causada por su contenido de agua. Dicha tendencia continúa salvo dos picos alrededor del 1.6 y $2.2 \mu\text{m}$.

En general, las hojas tienen una gran absorción de energía en el infrarrojo lejano y se comportan como cuerpos negros con una emisividad (E) cercana a 1 (Figura 2).

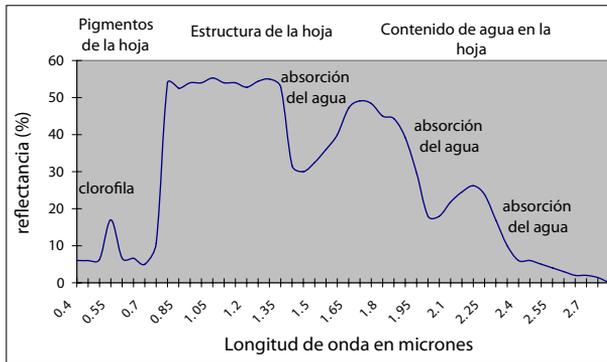


Figura 2. Firma espectral de la vegetación fotosintéticamente activa (tomado de Jensen, 1986).

Esta firma espectral corresponde a la vegetación fotosintéticamente activa. Sin embargo, al disminuir la cantidad de clorofila, como en el caso de la vegetación que como estrategia tira sus hojas durante la época seca del año (vegetación decidua), la absorción en el espectro visible aumentará; adicionalmente el cambio en la estructura de la hoja, debido a las condiciones de marchitamiento, hará que la reflectividad en el infrarrojo disminuya.

En resumen, la vegetación fotosintéticamente activa posee una diferencia muy marcada entre su reflectividad en el visible y en el infrarrojo cercano, mientras que en la vegetación en condiciones de marchitamiento dicha diferencia es menor.

Aunque este panorama es verdadero para la mayoría de las especies, los detalles difieren de acuerdo con el grosor, edad, contenido de agua, morfología superficial y orientación de sus hojas (Jones, 1983).

La reflectancia puede ser mayor para las hojas blancas recubiertas de pelos, serosas o con un bajo contenido de humedad. Jones (1983) señala que, por ejemplo, para *Atriplex hymenelytra* la reflectancia en la porción verde del espectro puede variar del 35% en invierno al 60% en verano como una función del contenido de humedad. Por otra parte la presencia de pelos en el envés de la hoja también afecta la reflectancia, haciendo que ésta aumente en el haz. En cuanto a la morfología, por ejemplo, las hojas aciculares absorben más energía en todas las longitudes de onda y por el contrario las plantas suculentas son más reflectivas en todo el espectro.

La composición bioquímica de las hojas, afectará su reflexión. Los pigmentos fotosintéticos modificarán la reflectancia en la región del visible. La presencia de lignina, celulosa y proteínas la modifica en el infrarrojo cercano y medio (Curran y Kupiec, 1995).

La respuesta de hojas de diferente edad o que se encuentran en diferentes ubicaciones dentro de la misma planta, será distinta.

Respuesta espectral de las comunidades vegetales. No sólo las plantas, como organismos individuales, poseen firmas espectrales definidas; la forma en que éstas se encuentren agrupadas también se reflejará en diferentes curvas espectrales. Es así que, según Danson (1995) la curva de reflectividad de un dosel con cierta arquitectura será una función de:

- El índice de área foliar (IAF), (área superficial de hojas por unidad de superficie del suelo). Así por ejemplo en cultivos existe, en general, una correlación negativa entre la reflexión en el rojo y el IAF, hasta llegar a un IAF de 1-2 donde la curva se aplanan (lo mismo sucede en el infrarrojo medio). En el infrarrojo cercano la correlación es positiva hasta alcanzar valores de IAF de 3-4.
- La cobertura vegetal. En sistemas agrícolas la cobertura vegetal y el IAF tienen una relación muy estrecha; sin embargo, en otro tipo de sistemas (como bosques) dicha relación puede no existir, por lo que es importante discriminar ambos parámetros. Algunos estudios muestran una correlación negativa entre la cobertura y la reflectancia en el rojo e infrarrojo, aunque la pendiente es mucho menos pronunciada en el infrarrojo.
- Las propiedades ópticas de las hojas (descritas anteriormente).
- La ubicación espacial de las hojas, es decir, su distribución horizontal, vertical y su grado de solapamiento.
- La orientación de las hojas.
- La reflectancia del suelo.
- Las características de la energía incidente, como el ángulo del zenit o del azimut del sol.

La vegetación vista desde el espacio. Una de las aplicaciones más comunes de estas características reflectivas es el estudio de la vegetación a partir de imágenes de satélite. Los sensores a bordo de satélites poseen filtros que les permiten registrar simultáneamente la energía reflejada o emitida en zonas muy específicas del espectro. De esta forma es posible comparar el comportamiento reflectivo de un área específica (cuyo tamaño varía de acuerdo con el sensor empleado) a diferentes longitudes de onda.

Una de las formas más comúnmente usadas de comparar dicho comportamiento, es el conocido como índice de vegetación normalizado (NDVI por sus siglas en inglés), cuya fórmula general es (Gilbert *et al.*, 1997):

$$\text{NDVI} = (\text{IR} - \text{VIS}) / (\text{VIS} + \text{IR})$$

donde: VIS = porción visible del espectro.

IR = porción infrarrojo cercano.

De esta forma se obtiene una nueva imagen con valores que van de -1 a 1 y que en diversos estudios han sido correlacionados con factores de la vegetación tales como el IAF, la cobertura, la biomasa, la productividad primaria, las tasas de transpiración y la presencia y grado del estrés hídrico (Gómez *et al.*, 2008).

El procesamiento digital de las imágenes permite identificar y agrupar elementos que tengan una firma espectral semejante, de esta forma es posible obtener mapas de tipos de vegetación. Este proceso se basa en el supuesto de que cada tipo de vegetación poseerá una diferente estructura y composición específica que, como se ha visto, dará como consecuencia una firma espectral característica.

Sin embargo, no en todos los casos el sensor es capaz de una discriminación total, ya que existen diferentes tipos de vegetación que en determinadas condiciones pueden poseer curvas espectrales casi idénticas.

En este punto es importante mencionar que los sensores registran el promedio de la reflectividad en una superficie dada de la tierra. Es así, por ejemplo, para LANDSAT TM el elemento mínimo será de 30 x 30 m y para las imágenes AVHRR éste es de 1 100 x 1 100 m.

Las características espectrales de las plantas individuales y de las comunidades vegetales serán el resultado de sus propiedades físicas y estructurales. El estudio de la vegetación, a partir de imágenes de satélite, es un buen ejemplo de las aplicaciones de dichas características.

Una importante área de investigación ha sido la detección de cambio que analiza las diferencias en la cobertura vegetal y en el uso del suelo a lo largo del tiempo. Las técnicas de detección de cambio utilizan a las imágenes de satélite como un insumo principal; se basan en el supuesto de que cualquier transformación en la cobertura resultará en alteraciones en los valores de reflectancia lo suficientemente grandes para ser registradas.

Una vez obtenida la imagen de cambio, producto de la resta del NDVI de dos imágenes consecutivas, se deberá decidir cómo separar los píxeles de cambio, del resto del área. Por ejemplo, en el caso de una resta de imágenes los píxeles de no cambio tendrán valores cercanos a cero; por el contrario, los de cambio poseerán valores absolutos grandes. Es ahí donde el analista deberá decidir un valor umbral por encima del cual considerará que ha habido alguna transformación. En sistemas biológicos la situación es compleja ya que el cambio es una característica intrínse-

ca y natural (Botkin *et al.*, 1989). Fung y LeDrew (1988), entre otros, han tratado de encontrar el valor umbral óptimo. Ellos llegan a la conclusión que de acuerdo con la técnica usada será el tipo de cambio encontrado. Por ejemplo, para transformaciones de zonas rurales a urbanas, la resta de bandas 2 en MSS es adecuada.

El siguiente problema, después de encontrar las zonas donde el cambio ha ocurrido, es definir hasta qué punto no es debido a la dinámica intrínseca del sistema que pueda llevar a condiciones menos productivas. Es ahí donde el uso de otro tipo de información de respaldo podrá indicar la importancia de acuerdo con la ubicación espacial del cambio (Gómez, 1997).

En general, los estudios de detección de cambio para el ordenamiento territorial en México han empleado fuentes existentes, tales como mapas de INEGI, series 1 a 3, y/o los Inventarios forestales de 1994 y 2000 (Palacio *et al.*, 2004.). Velázquez *et al.*, publicaron en 2003 un estudio donde ocupan mapas de cobertura vegetal, realizados en previas investigaciones, superpuestos sobre imágenes LANSTAT ETM+ y con 300 puntos de muestreo, para detectar cambios en el uso del suelo en el estado de Oaxaca, los cuales cuantificaron y mapearon.

Metodología

Análisis climático

Para el desarrollo de este capítulo se consideró la base de datos de temperatura-precipitación durante 30 años de tres estaciones de registro San Lorenzo, San Jerónimo y Tezoyo, del programa ERIC III (2006), el cual contiene la información de la base de datos históricos del Servicio Meteorológico Nacional (Figura 3). Para el análisis de la frecuencia interanual de El Niño y La Niña en un lapso de tres décadas se consultó la página de la NOAA (2007). Se graficaron y correlacionaron los parámetros anteriores para su posible asociación.

Se utilizó el modelo de elevación del terreno INEGI con resolución espacial de 100 m. Mediante el programa Arc/Info se identificó la dirección del flujo y la acumulación del mismo, para posteriormente obtener la delimitación de la Cuenca.

Detección de cambio

Las diferencias en las superficies o espejos de agua de la laguna de Tecocomulco, su composición y densidad de vegetación fueron calculadas a partir de imágenes de satélite LANSAT procesadas de la siguiente manera.

Obtención de imágenes de satélite de la zona. Para esta parte del estudio se emplearon tres imágenes: Landsat TM de 1985 (31/01/85), Landsat ETM+ del 2000 (21/03/00) y 2002 (18/08/2002).

Integración de la información. Las imágenes fueron importadas al sistema de procesamiento digital de imágenes ENVI, co-registradas, es decir, se aseguró que su geometría fuese idéntica, de modo que un punto identificable en una imagen fuese exactamente el mismo en la otra imagen y cortadas de acuerdo con los límites de la subcuenca.

Cálculo de índices de vegetación normalizados (NDVI). Para las imágenes de 1985 y 2002.

Resta de NDVI. De acuerdo con sus desviaciones estándar respecto a la media, se clasificaron en siete zonas de cambio. Para la zona estudiada fueron adecuados los valores de alrededor de una desviación estándar respecto a la media de los datos digitales resultantes.

A las imágenes de 1985 y 2000 se les aplicaron, primero un algoritmo de componentes principales y, posteriormente, una clasificación no supervisada con el fin de no sólo extraer el contorno de la laguna, sino tratar de identificar y mapear la vegetación acuática y los sedimentos presentes en la laguna. Para este proceso se empleó el programa ENVI 4.0

Los productos resultantes fueron integrados en el SIG ArcView 3.2.

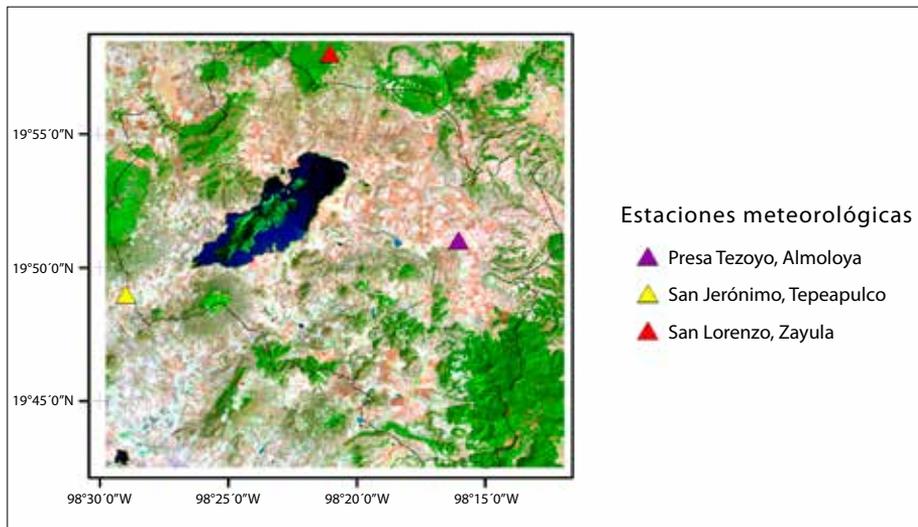


Figura 3. Ubicación de las estaciones meteorológicas analizadas (fuente: ERIC III, 2006).

Se efectuaron análisis de los datos de las coberturas junto con los registros de las zonas de cambio para obtener los datos estadísticos de la dirección de dichos cambios.

Resultados

Temperatura y precipitación

La estación meteorológica San Jerónimo ha registrado en un periodo de tres décadas una tendencia al aumento térmico, especialmente visible en los 90', registrándose en 1977 una temperatura de 12.1° y en 1998 13.7°, asociándose solamente con la presencia de El Niño en su periodo más largo (1990-1995) y en 1998. Sin embargo, hubo una disminución intermedia con La Niña en 1996 (Figura 4).

En relación con la precipitación, la presa Tezoyo es la que ha presentado los máximos (poco más de 900 mm) y los mínimos (cercanos a los 400 mm; Figura 5).

Cuando se grafica el patrón de precipitación pluviométrica anual en las tres estaciones de registro (Tezoyo, San Lorenzo y San Jerónimo) presenta una variación similar durante aproximadamente 30 años (Figura 6); aparentemente sin asociación con los fenómenos de El Niño y La Niña, porque la fuente de información de la NOAA (2007) refiere dentro de un solo año la presencia de los dos fenómenos, incluso con intensidades altas. Sin embargo, con base en lo planteado por Magaña y Gay (2006), las lluvias de invierno en años Niño se intensifican y se debilitan durante el verano, ocurriendo lo opuesto durante los años de La

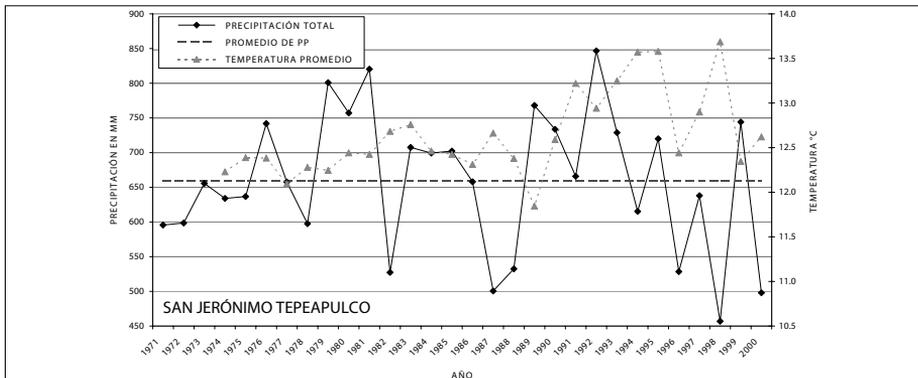


Figura 4. Condiciones de temperatura y precipitación registradas en la estación San Jerónimo Tepeapulco para el periodo 197 (tomado de ERIC III, 2006).

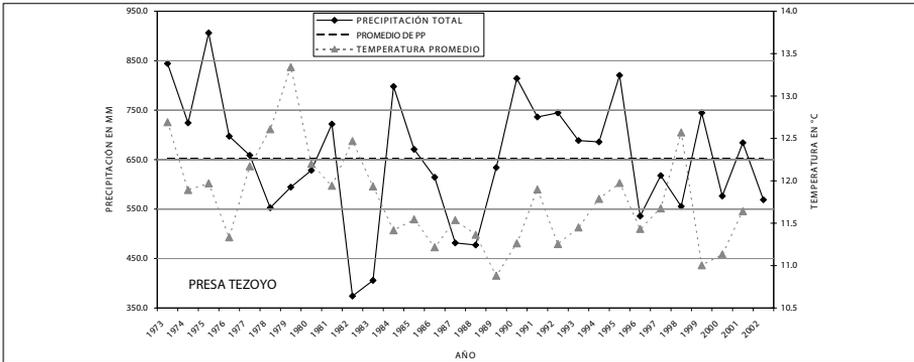


Figura 5. Condiciones de temperatura y precipitación registradas en la estación Presa Tezoyo para el periodo 1973-2002. Tomado de ERIC III, 2006.

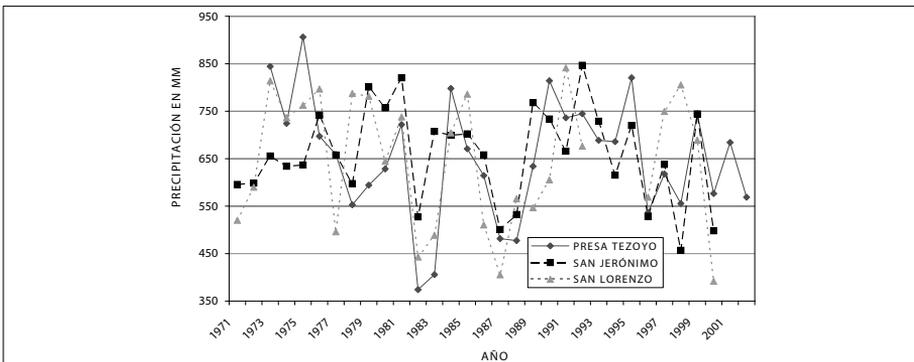


Figura 6. Precipitación total anual de las estaciones analizadas para el periodo 1971-2002 (tomado de ERIC III, 2006).

Niña; se optó por asociar los fenómenos en esas dos épocas en la estación de registro San Jerónimo que es la más cercana a la laguna de Tecocomulco.

De esta manera se logró cierta asociación entre algunos eventos de El Niño con lluvias en el invierno, como se muestra en la Figura 7; aunque la correspondencia no es muy precisa se puede observar que en el invierno 78-79, aun con un índice bajo (0.8), hubo un incremento de la precipitación en forma significativa, al igual que en El Niño más prolongado de 1990-93. En el caso de la disminución de las lluvias de verano por debajo de lo normal durante El Niño. En la Figura 8 se puede apreciar una aparente asociación inversa aunque no muy clara, a excepción de algunos años; por ejemplo, cuando el índice está por arriba de 1.4

la precipitación disminuye como fue en 1972, 1982, 1987 y 1997, correspondiéndole a este último año un Niño fuerte con un índice alto (> 2.6).

Dado que en La Niña se presenta una condición inversa a lo que sucede en El Niño, se puede observar en la Figura 9 que solamente con índices más negativos (Niña intensa) hay menos precipitación en invierno, como en 1973-1974, 1975-1976, 1988-1989 y 1999-2000; esto se corrobora con la correlación significativa ($r = 0.705$) de la Figura 10. En el caso de las lluvias de verano no es muy clara la asociación, con índices menos negativos o Niñas menos intensas como de 1974, 1984, 1985, 1989 y 1999 la precipitación incrementa (Figura 11).

Las precipitaciones disminuyeron significativamente en 1973 cuando la laguna de Tecocomulco tuvo una escasa superficie de 4.5 km² (Figura 12). Tanto en el verano como en el invierno de El Niño 1982-1983 (catalogado como índice 3.0, de los más altos del siglo pasado), se infiere una influencia en la reducción de

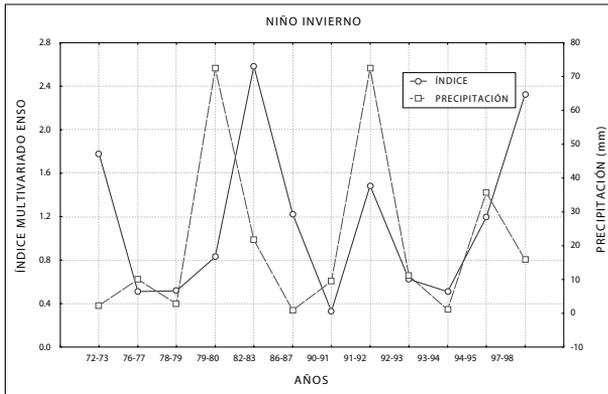


Figura 7. Precipitación invernal para la estación San Jerónimo de 1972 a 1998 vs. Índice Multivariado ENSO. Base de datos tomados de <http://www.cdc.noaa.gov/people/klaus.wolter/MEI/table.html> y Servicio Meteorológico Nacional <http://smn.cna.gob.mx/productos/normales/estacion/hgo/NORMAL13027.TXT>

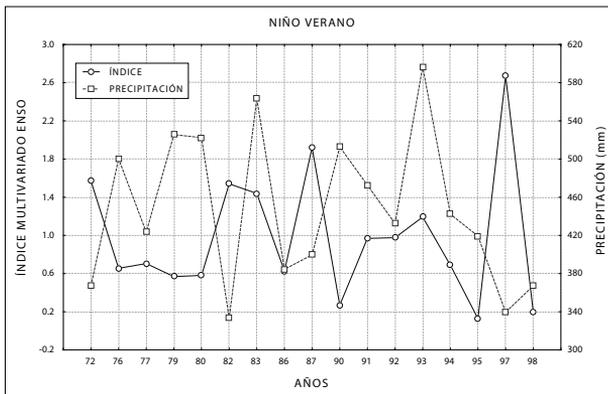


Figura 8. Precipitación de verano para la estación San Jerónimo de 1972 a 1998 vs. Índice Multivariado ENSO. Base de datos tomados de <http://www.cdc.noaa.gov/people/klaus.wolter/MEI/table.html> y Servicio Meteorológico Nacional <http://smn.cna.gob.mx/productos/normales/estacion/hgo/Normal13027.TXT>

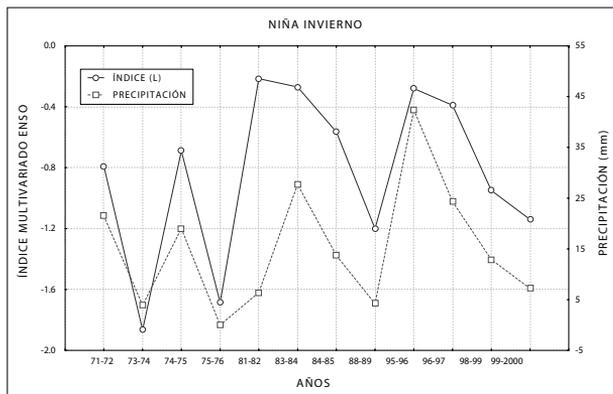


Figura 9. Precipitación de invierno para la estación San Jerónimo de 1971 a 2000 vs. índice multivariado ENSO Base de datos de <http://www.cdc.noaa.gov/people/klaus.wolter/MEI/table.html> y Servicio Meteorológico Nacional <http://smn.cna.gob.mx/productos/normales/estacion/hgo/Normal13027.TXT>

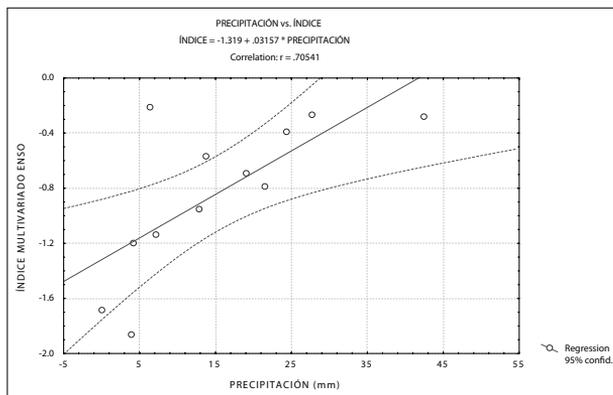


Figura 10. Correlación entre el Índice Multivariado ENSO y la precipitación en las Niñas intensas de invierno.

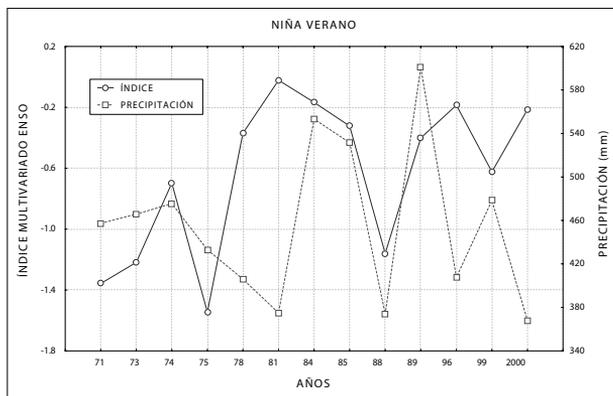


Figura 11. Precipitación de verano para la Base de datos de la estación San Jerónimo Tepeapulco de 1971 a 2000 Índice Multivariado ENSO. <http://www.cdc.noaa.gov/people/klaus.wolter/MEI/table.html> y Servicio Meteorológico Nacional <http://smn.cna.gob.mx/productos/normales/estacion/hgo/Normal13027.TXT>

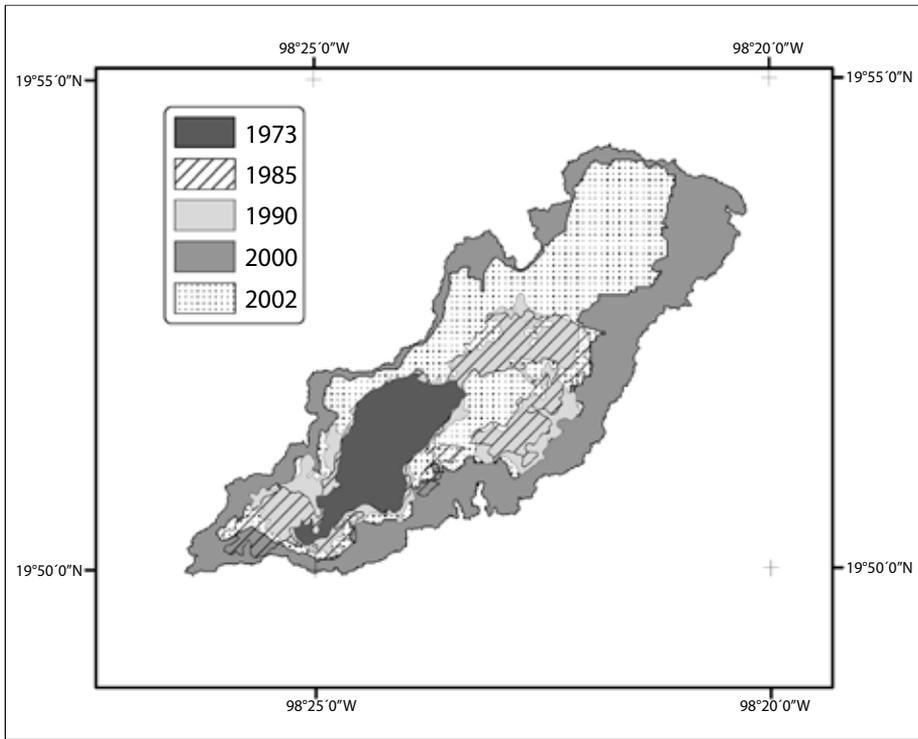


Figura 12. Cambios en la extensión de la laguna de Tecocomulco entre 1973 y 2002 (tomada de De la Lanza y Gómez, 2005).

la superficie hasta 1985 en donde el área inundada fue de sólo 11.3 km² (imagen analizada en este trabajo como Figura 13a), a pesar de que correspondió al predominio de una Niña de un índice negativo (bajo de -0.3) con un verano lluvioso. En el 2000 aumentó hasta 36 km² de superficie tomando como base la imagen de satélite de marzo de ese año, catalogado como de Niña (con índice -0.5) que se presentó incluso desde 1999 (índice -0.8) donde la precipitación de verano fue mayor con posibilidades de incrementar y conservar su volumen hasta el 2000 (Figura 13b). Nuevamente, para el 2002 se presentó otro Niño que redujo la superficie a 22 km².

Cambios en la vegetación. Además de los cambios significativos en la superficie acuática interanual que experimenta la laguna (Figura 12), era de esperarse también cambios en la densidad y distribución de la vegetación. Comparando las imágenes de 1985 y 2000 (Figuras 13a y b), ambas con la presencia de La Niña pero con diferente IME (Índice Multivariado ENSO), se observa que la superfi-

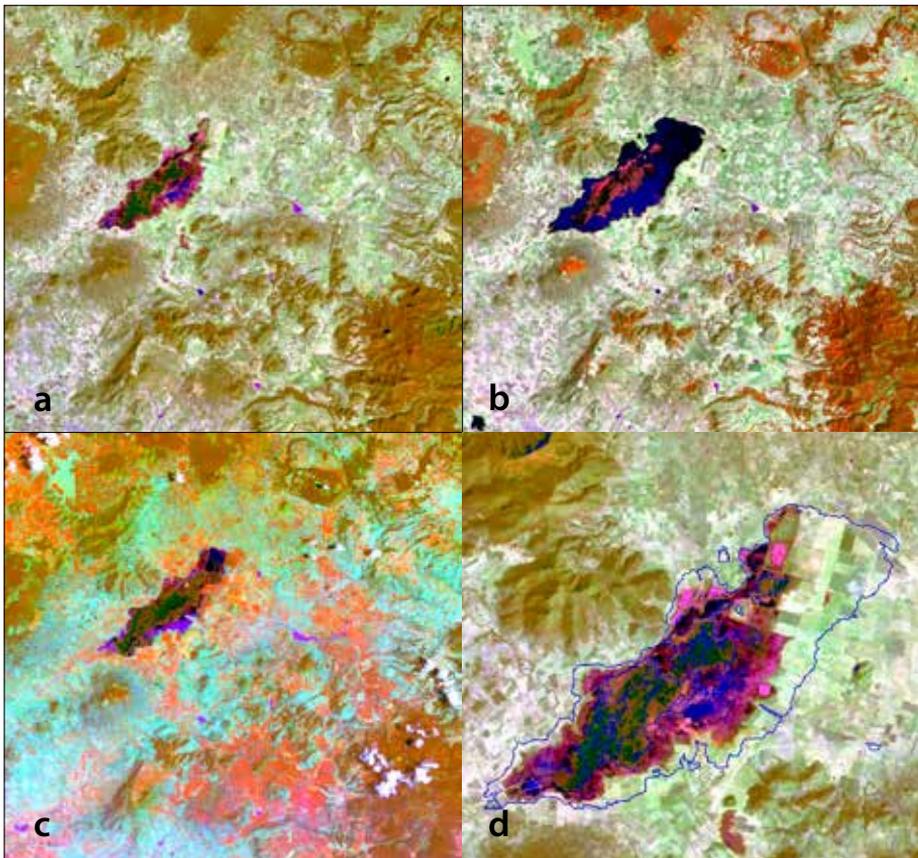


Figura 13. a) Imagen Landsat TM del 31 de enero de 1985. Falso color. b) Imagen Landsat ETM+ del 21 de marzo del 2000. Falso color. c) Imagen Landsat ETM+ del 18 de agosto del 2002. Falso color. d) Imagen Landsat TM del 31 de enero de 1985 con los polígonos que delimitan el límite de la laguna en el 2000 y la cobertura del tular.

cie en 1985 fue solo del 30% de la del 2000, registrándose en este último año que el tular también aumentó particularmente en la parte central del cuerpo de agua (Figura 13d). A partir de los compuestos en falso color (bandas 4, 5 y 2) es posible apreciar, en forma cualitativa, la distribución de vegetación acuática (representada en tonos rosados) al interior de la laguna. Con base en lo anterior, en el 2000 (Figura 13b) es donde aparentemente se encuentra la mayor densidad del tular, comparada con los años 1985 y 2002 (Figuras 13a-c, respectivamente).

A partir de la diferencia de los NDVI, es posible identificar las zonas donde la laguna cambia. El supuesto básico es que, dada una distribución normal, las zonas que permanecen sin cambio tendrán, en dicha diferencia, valores cercanos a cero, mientras que las zonas de cambio tendrán valores positivos o negativos relativamente grandes. Para decidir hasta qué punto un píxel pertenece a una zona con cambio, se realizó un análisis estadístico de los datos mediante la desviación estándar; así, las zonas con valores del promedio más o menos una desviación estándar, se calificaron como las que no poseen cambio. Al comparar el NDVI para 1985 contra el respectivo de 2000 (Figura 14) se encontró que la zona central del tular tuvo un incremento en la densidad de vegetación reflejada en los tonos verdes, que representan un 18.57%; esto corresponde a lo observado en el falso color donde, como ya se mencionó, en el 2000 la densidad del tular aparentó ser mayor. El 23.07% de la superficie no presentó cambios, correspondiente a algunas partes del centro del tular, y las orillas de la laguna. El 48.12% registró un ligero decremento en el NDVI en zonas donde se ha incrementado la extensión del agua. Las zonas con decrementos de moderados a fuertes corresponden a las orillas del cuerpo de agua en 1985, donde existían las condiciones para el desarrollo del tular.

Al comparar las coberturas existentes entre 1985 y 2002 a partir de sus imágenes clasificadas (Figura 15), es evidente que en 1985 (Figura 15a) hubo áreas importantes de vegetación, menor azolvamiento, así como la presencia de cultivos que estaban en zonas que en 2002 (Figura 15b) se encontraban cubiertas por el agua.

La Tabla 1 muestra la distribución por clases para 1985 y la dirección del cambio para 2002. De lo anterior, destaca que el 60% del azolvamiento perma-

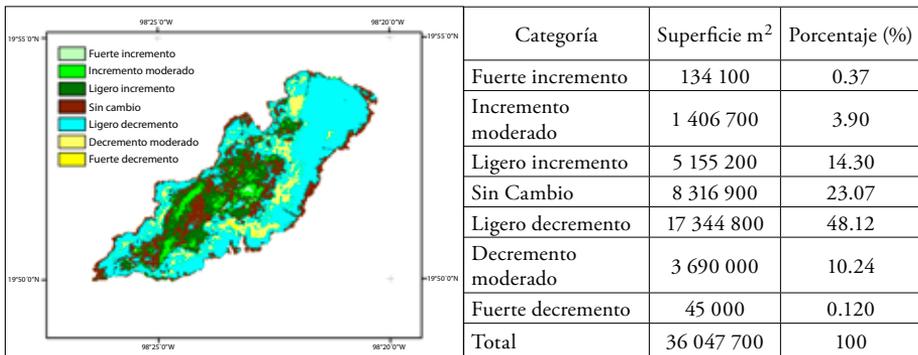


Figura 14. Cambio en la cantidad de vegetación entre 1985 y 2000.

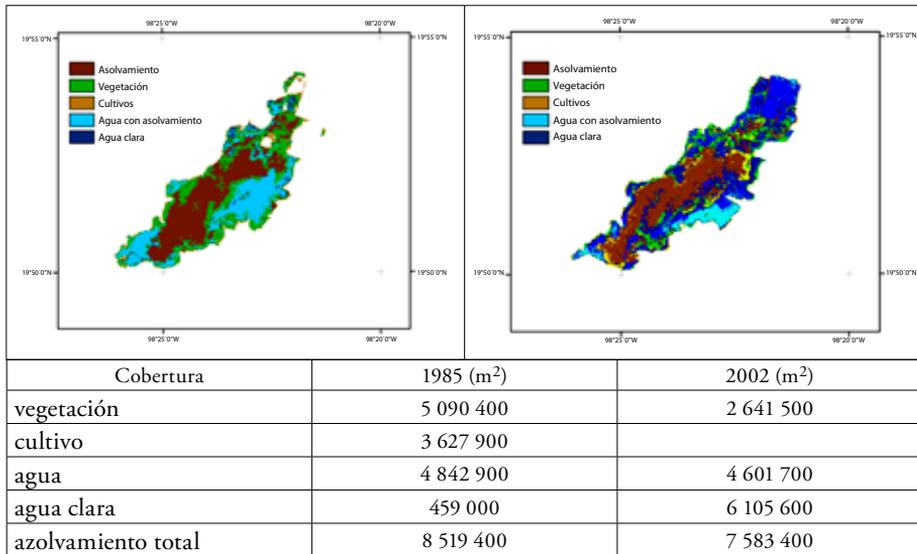


Figura 15. Mapas de cobertura obtenidos a partir de la clasificación de las imágenes de satélite para 1985 (a) y 2002 (b).

Tabla 1. Porcentaje de cambio por cobertura en 1985

1985 2002	Azolvamiento (%)	Vegetación (%)	Azolvamiento orilla (%)	Cultivo (%)	Agua (%)	agua clara (%)	Total general (%)
agua con sedimentos	9.72	13.47	13.90	47.04	25.16	30.98	20.42
agua	17.13	29.53	20.76	23.82	43.65	31.96	27.09
azolvamiento	60.17	30.48	21.48	8.93	15.16	8.82	33.64
vegetación	7.72	15.72	29.96	15.55	8.49	21.18	11.72
suelo	5.26	10.80	13.90	4.66	7.53	7.06	7.13

neces sin cambio y el 17% se encuentra cubierto por agua para 2002. Es claro que las zonas con azolvamiento han permanecido relativamente más estables mientras que los bordes de la laguna son las superficies más cambiantes.

Adicionalmente a los cambios en la cobertura de la laguna, el resto de la subcuenca también ha experimentado cambios en su cobertura. En la Figura 16 se observa la parte suroeste donde existen bosques (en tonos rojos) y zonas de

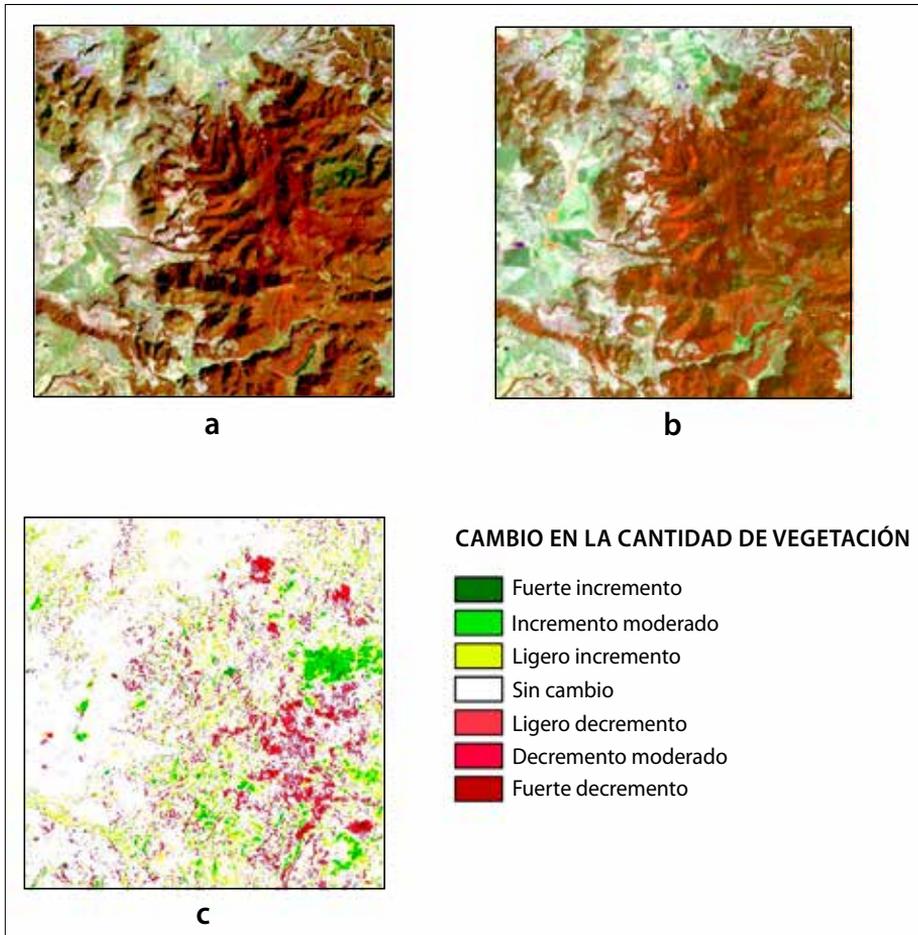


Figura 16. Cambio entre 1985 y 2000 en la parte sureste de la subcuenca. a) Falso color de la imagen de 1985; b) falso color de la imagen de 2000 y c) cambio en la vegetación entre 1985 y 2000.

cultivo. Los cambios entre las dos fechas (Figura 16a y b) se pueden observar a simple vista. Al realizar la resta de los NDVI es posible resaltar los cambios más importantes (Figura 16c). En consecuencia, se pueden destacar las zonas donde ha habido una fuerte deforestación, otras donde al parecer el bosque se ha recuperado y las zonas donde el uso de suelo se ha modificado, es decir, se han abierto nuevas tierras al cultivo, que según De la Lanza y Gómez (2005) es del 9.3% para dicho periodo.

Conclusiones

Este estudio evidencia las variaciones y cambios importantes que la laguna de Tecocomulco y la subcuenca a la que pertenece, han experimentado en los últimos 30 años y que están fuertemente relacionados con los fenómenos meteorológicos tales como El Niño y La Niña. La zona es además afectada por un uso agrícola importante en expansión a costa de la vegetación natural. Dicha deforestación puede tener graves efectos en el escurrimiento y provocar un azolve importante en la superficie acuática.

La zona estudiada es hábitat de un importante número de especies migratorias y cualquier cambio puede provocar su disminución e inclusive su desaparición.

A través del procesamiento e interpretación de las imágenes satelitales, se destacan tanto la dinámica hidrológica (expansión, contracción de la superficie lagunar), así como los cambios en la distribución del tular asociado a fluctuaciones en el nivel del agua, como del manejo que los lugareños den al recurso acuático. Además, a través de la citada técnica se determinó la significativa deforestación de la Cuenca que también ha agudizado la tendencia al asolvamiento con pérdida de la profundidad e incremento de superficie lacustre.

Referencias

- Botkin, D. B., M. F. Caswell, J. E. Estes and A. A. Orio (1989), *Changing the global environment: perspectives of human involvement*, Academic Press, Boston, USA.
- Caballero, M., G. S. Lozano, B. Ortega, J. Urrutia and J. L. Macías (1999), "Environmental characteristics of lake Tecocomulco, northern basin of Mexico, for the last 50,000 years", *J. Paleolimnol.*, no. 22, pp. 399-411.
- Caballero, M., G. S. Lozano, B. Ortiz, J. Urrutia y J. L. Macías (2005), "La Laguna de Tecocomulco: su historia durante los últimos 50 000 años", en Huízar-Álvarez, R.,

- E. J. Jiménez-Fernández y C. Juárez-López (comps.), *La Laguna de Tecocomulco. Geología de un Desastre*, UNAM, Publicación Especial 3. pp. 49-72.
- CNA (2000), *Determinación de la Disponibilidad del Agua en el Acuífero de Tecocomulco, Estado de Hidalgo, México*, Comisión Nacional del Agua, México.
- Curran, P. J. and J. A. Kupiec (1995), "Imaging spectrometry: a new tool for Ecology", in Danson, F. M. and S. E. Plummer (eds.), *Advances in environmental remote sensing*, Willey & Sons, Chichester New York.
- Chuvieco, E. (1991), *Fundamentos de teledetección espacial*, Editorial Rialp, Madrid.
- Danson, F. M. (1995), "Developments in remote sensing of forest canopy", in Danson, F. M. and S. E. Plummer (eds.), *Advances in environmental remote sensing*, Willey & Sons, Chichester, New York.
- De la Lanza-Espino, G. y G. Gómez-Rodríguez (2005), "Analysis of the short term geo-environmental evolution of an endorreic basin using satellite images: the case of Tecocomulco lagoon, Mexico", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 58, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 66-79.
- Fung, T. and E. LeDrew (1988), "The determination of the optimal threshold levels for change detection using various accuracy indices", *Photogrammetric. Engineering and Remote Sensing*, vol. 54, no. 10, pp. 1449-1454.
- García-Palomino, A. y J. L. Macías (2005), "Estratigrafía y geología estructural de la región de Apan: subcuena de Tecocomulco, estado de Hidalgo", en Huízar-Álvarez, R., E. G. Jiménez-Fernández y C. Juárez-López (comps.), *La Laguna de Tecocomulco. Geología de un Desastre*, UNAM, Publicación Especial 3, pp. 21-32.
- Gilbert, M. A., J. González-Piqueras y J. García-Haro (1997), "Acerca de los Índices de Vegetación", *Revista de Teledetección*, núm. 8, pp. 1-10.
- Gómez, G. (1997), "Patrones de cambio en la zona de la presa Marte R. Gómez, Tamaulipas, México", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 35, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 121-135.
- Gómez-Mendoza, L., L. Galicia, M. L. Cuevas-Fernández, V. Magaña, G. Gómez and J. L. Palacio-Prieto (2008), "Assessing onset and length of greening period in six vegetation types in Oaxaca, Mexico, using ndvi-precipitation relationship", *International Journal of Biometeorology*, no. 52, pp. 511-520.
- Granados-Sánchez, D., H. R. Germán, G. Flores y R. López (2005), "Vegetación de la porción noreste de la subcuena de Tecocomulco", en Huízar-Álvarez, R., E. J. Jiménez-Fernández y C. Juárez-López (comps.), *La Laguna de Tecocomulco. Geología de un Desastre*, UNAM, Publicación Especial 3, pp. 149-168.
- Harris, R. (1987), *Satellite Remote Sensing. An Introduction*, Routledge & Kegan Paul, London.
- Huízar-Álvarez, R. y J. E. Ruiz-González (2005), "Aspectos físicos y socioeconómicos de la subcuena de Tecocomulco", en Huízar-Álvarez, R., E. J. Jiménez-Fernández y C. Juárez-López (comps.), *La Laguna de Tecocomulco. Geología de un Desastre*, UNAM, Publicación Especial 3, pp. 9-17.

- Jensen, J. R. (1986), *Introductory digital image processing. A remote sensing perspective*, Prentice-Hall, New Jersey.
- Jones, H. G. (1983), *Plants and microclimate*, Cambridge University Press, London.
- Lot-Helguera, A. y A. Novelo-Retama (1978), *Laguna de Tecocomulco Hidalgo, Méx., Guías Botánicas de Excursiones en México*, Sociedad Botánica de México, México.
- Lot-Helguera, A. (2005), “Vegetación acuática de la Laguna de Tecocomulco”, en Huízar-Álvarez, R., E. J. Jiménez-Fernández y C. Juárez-López (comps.), *La Laguna de Tecocomulco. Geología de un Desastre*, UNAM, Publicación Especial 3, pp. 141-148.
- Magaña, V. O. y C. Gay-García (2006), *Vulnerabilidad y adaptación regional ante el cambio climático y sus impactos ambiental, social y económicos*, Instituto Nacional de Ecología, México.
- NOAA (2007), <http://www.cdc.noaa.gov/people/klaus.wolter/MEI/rank.html>
- Palacio-Prieto, J. L., M. T. Sánchez-Salazar, J. M. Casado-Izquierdo, E. Propín-Frejomil, J. Delgado-Campos, A. Velázquez-Montes, L. Chías-Becerril, M. I. Ortiz Álvarez, J. González-Sánchez, G. Negrete-Fernández, J. Gabriel-Morales, R. Márquez-Huitzil, T. Nieda-Manzano, R. Jiménez-Rosenberg, R. Muñoz-López, D. Ocaña-Nava, E. Juárez-Aguirre, C. Anzaldo-Gómez, J. C. Hernández-Esquivel, K. Valderrama-Campos, J. Rodríguez-Carranza, M. J. Campos-Campuzano, H. Vera-Llamas Cruz y C. G. Camacho-Ramírez (2004), *Indicadores para la Caracterización y el Ordenamiento Territorial*, SEDESOL, SEMARNAT, INE, UNAM.
- Ruiz-González, J. E. y R. Huízar-Álvarez (2005), “La erosión en la subcuenca de Tecocomulco”, en Huízar-Álvarez, R., E. J. Jiménez-Fernández y C. Juárez-López (comps.), *La Laguna de Tecocomulco. Geología de un Desastre*, UNAM, Publicación Especial 3, pp. 73-88.
- SMN <http://smn.cna.gob.mx/productos/normales/estacion/hgo/Normal13027.TXT>
- Velázquez, A., E. Durán, I. Ramírez, J.-F. Mas, G. Bocco, G. Ramírez and J. L. Palacio (2003), “Land-use cover change processes in highly biodiverse areas: the case of Oaxaca, Mexico”, *Global Environmental Change*, no. 13, pp.175-184.

Bases de datos digitales

Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC III, 2006).

Estudios sobre los remanentes de cuerpos de agua en la Cuenca de México, editado por el Instituto de Geografía, se terminó de imprimir el 30 de marzo de 2010, en los talleres de Navegantes de la comunicación gráfica, S.A. de C.V. Pascual Ortíz Rubio, no. 40, San Simón Ticumac, Del. Benito Juárez, 03660, México, D.F.

El tiraje consta de 500 ejemplares impresos en offset sobre papel cultural de 90 gramos para interiores y couché de 250 gramos para los forros. Para la formación de galeras se usó la fuente tipográfica Adobe Garamond Pro, en 9.5/10, 10/12, 11.2/12.7 y 16/19 puntos.

Edición realizada a cargo de la Sección Editorial del Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México. Revisión y corrección de estilo: Martha Pavón. Formación de galeras y cuidado de la impresión: Laura Diana López Ascencio.

Estudios sobre los remanentes de cuerpos de agua en la Cuenca de México

Raúl Aguirre Gómez

Coordinador

La Cuenca de México es actualmente el asiento de una de las megalópolis más pobladas y extensa del mundo, donde tienen jurisdicción política el Distrito Federal y los Estados de México, Hidalgo, Tlaxcala y Puebla. Es difícil imaginar que hasta hace poco más de 500 años la Cuenca de México era un extenso sistema lacustre que fue asiento de muchas culturas mesoamericanas. Actualmente, de la extensa zona lacustre sólo quedan algunos cuerpos de agua importantes: el lago de Texcoco; el lago de Zumpango, una red de canales de agua dulce en las zonas de Xochimilco y en los alrededores de Chalco y Mixquic, y el Lago de Tecocomulco, en el estado de Hidalgo, principalmente.

El objetivo del presente libro es brindar una perspectiva novedosa sobre los estudios que se realizan en la Cuenca de México. Para partir de una base objetiva, se ofrece inicialmente un análisis sobre el desarrollo histórico de la transformación lacustre de la cuenca en la megalópolis actual, posteriormente se presenta un estudio de la calidad del agua del Lago de Xochimilco y, finalmente, se muestran tres estudios donde se aplican técnicas de percepción remota en algunos de los cuerpos de agua aún existentes en la cuenca. La contribución de cada uno de los distintos autores es relevante y pertinente. Es relevante porque es fundamental estudiar estos ecosistemas desde diferentes perspectivas con la idea de recuperarlos y/o mantenerlos en un estado saludable y es pertinente porque coadyuva y aporta a los esfuerzos que actualmente se hacen en favor de su conservación.

ISBN: 978-607-02-1988-7

