

RECONSTRUCCIÓN PALEOLIMNOLÓGICA DEL LAGO DE CHALCO, MÉXICO, DURANTE EL ÚLTIMO MÁXIMO GLACIAR—EL REGISTRO DE DIATOMEAS ENTRE 34,000 Y 15,000 AÑOS A.P.

Margarita E. Caballero-Miranda*

RESUMEN

Las condiciones paleolimnológicas que dominaron en el lago de Chalco durante el último máximo glaciario (ca. 22,000 a 18,000 años A.P.) fueron reconstruidas, mediante el análisis del contenido de diatomeas, en sedimentos provenientes de una sección de un núcleo extraído de la parte central del antiguo lago. Esta sección está delimitada por la presencia de dos tefras, que también han sido identificadas y fechadas en el sitio arqueológico de Tlapacoya: en la parte inferior, la gran ceniza basáltica—ca. 34,000 años A.P.—y en la parte superior, la pómez con andesita (ca. 14,500 a 15,000 años A.P.). Durante el intervalo representado por esta sección, el lago pasó por cuatro periodos: (1) Entre ca. 34,000 y 31,000 años A.P., Chalco fue un lago alcalino-salino, de profundidad moderada y aguas abiertas. (2) Entre ca. 31,000 y 23,000 años A.P., el nivel lacustre se redujo y el lago de Chalco pasó a ser un pantano de aguas alcalino-salinas. (3) Entre ca. 23,000 y 18,500 años A.P., el nivel lacustre se recuperó y se estableció en el área un lago de aguas dulces, con profundidad moderada y abundante vegetación acuática y subacuática. (4) Después de los ca. 18,500, y por lo menos hasta los 14,500 años A.P., el nivel del lago volvió a reducirse, pero durante este intervalo, existieron fluctuaciones importantes entre aguas ácidas y neutras (dulces); es probable que estas fluctuaciones hayan estado asociadas con la intensa actividad volcánica que se registró durante este periodo. De acuerdo con los estudios efectuados en el sitio arqueológico de Tlapacoya, la entrada de los primeros seres humanos en el área pudo haber estado precedida por la transición entre ambientes salinos y dulces que ocurrió cerca de los 23,000 años A.P.

Palabras clave: Paleolimnología, Chalco, glaciario, diatomeas.

ABSTRACT

Diatom analyses of lacustrine sediments are used as basis for paleolimnological reconstruction of Lake Chalco during the last glacial maximum (ca. 22,000 – 18,000 yr B.P.). Analyses were carried out in sediments from a section of a core correlating to this period. This section is bracketed by two tephra layers that have also been studied and dated in the archaeological site of Tlapacoya: the "Gran Ceniza Basáltica"—ca. 34,000 yr B.P. at the bottom—and the "Pómez con Andesita" (ca. 14,500 to 15,000 yr B.P.) at the top. During the 34,000 and 14,500 yr B.P. interval four lake periods can be identified: (1) From ca. 34,000 to 31,000 years B.P. Lake Chalco was an alkaline-saline open lake. (2) Between ca. 31,000 and 23,000 yr B.P. lake levels dropped and Chalco became an alkaline-saline marsh. (3) Between ca. 23,000 and 18,500 yr B.P. lake levels recovered and a freshwater lake with abundant aquatic vegetation was established. (4) After 18,500 yr B.P. and at least until 14,500 yr B.P. the lake level reduced again but there were important fluctuations between slightly acidic and circumneutral waters; these fluctuations could be related to the intense volcanic activity recorded during this period. According to the archaeological studies at Tlapacoya, the transition towards a freshwater environment in Lake Chalco could have framed the entrance of early human populations in the basin ca. 23,000 yr B.P.

Key words: Paleolimnology, Chalco, glacier, diatoms.

INTRODUCCIÓN

En épocas pasadas, la cuenca de México albergó un extenso sistema lacustre, cuyas oscilaciones interanuales e interdecenales provocaron que, en algunas ocasiones, se extendiera formando un solo espejo de agua, mientras que en otras se fragmentara en cuerpos menores, determinados por la topografía interna de la cuenca: al norte, los lagos de

Zumpango y Xaltocan; el lago central de Texcoco y, finalmente, los lagos del sur: Chalco y Xochimilco (Figura 1). La evidencia histórica disponible permite reconstruir, con cierta precisión, las características, extensión y variaciones que este sistema tuvo durante los últimos siglos; sin embargo, poco se sabe sobre el origen y evolución de estos lagos en una escala de tiempo de milenios o decenas de miles de años.

La evolución de los lagos de la cuenca de México y su relación con variaciones climáticas en esta escala de tiempo, fueron el objetivo de diversos estudios (Clisby y Sears, 1955; Bradbury, 1971, 1989; González-Quintero y Fuentes-Mata, 1980; Lozano-García, 1989). Algunos de estos estudios, sin

*Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 D.F., México.

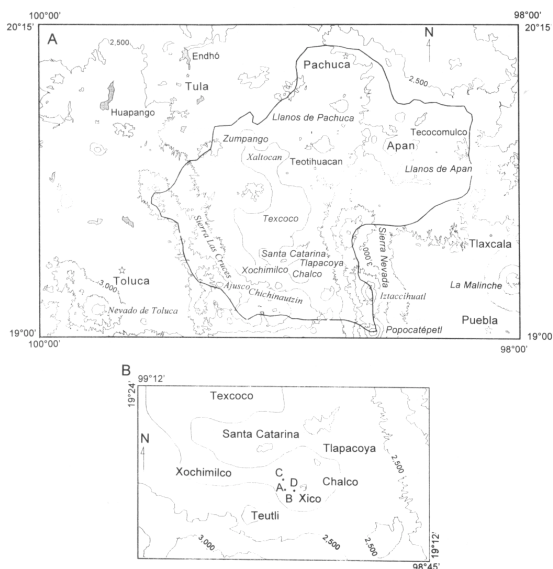


Figura 1. A, La cuenca de México con la distribución aproximada de los sedimentos lacustres. B, planicie lacustre de Chalco con la localización de los sondeos.

embargo, carecen de control cronológico por métodos radiométricos, o fueron realizados en secuencias litorales, en las cuales es factible que existan hiatos de sedimentación importantes. En el área de Chalco, existen dos estudios paleoambientales previos. El primero, realizado en la secuencia litoral del sitio arqueológico de Tapacoyá (Figura 1), cubre, aproximadamente, los últimos 35,000 años (Lorenzo y Mirambell, 1986); y el segundo, en sedimentos de un núcleo extraído de la planicie lacustre de Chalco cubre, aproximadamente, los últimos 14,500 años (González-Quintero, 1986; Bradbury, 1989). Estos trabajos fueron muy importantes en la historia de los estudios del Cuaternario en México, pero los resultados de los diversos análisis realizados—sedimentos, polen, diatomeas, etc.—presentan algunas contradicciones, que hacen difícil su interpretación global (Figura 2). Para ampliar y mejorar la información paleolimnológica y paleoclimática para el área, la Universidad Nacional Autónoma de México, a través de los institutos de Geología y Geofísica, inició un programa de investigaciones paleoambientales para la cuenca de México, el cual se enfocó, en su parte inicial, al estudio del ex-lago de Chalco (Lozano-García *et al.*, 1993; Lozano-García y Ortega-Guerrero, 1994).

Se presenta en este artículo los resultados del análisis del contenido de diatomeas en sedimentos lacustres provenientes de una sección de un núcleo (núcleo B), extraído del área central del antiguo lago de Chalco (Figura 1). Los fechamientos radiométricos y correlaciones con algunas de las tefras identificadas y fechadas en Tapacoyá, permiten situar esta sección entre los *ca.* 34,000 y los *ca.* 15,000 a 14,500 años antes del

Fechas aproximadas (ka A.P.)	Diatomeas Bradbury, 1989	Sedimentos Limbrey, 1986	Sedimentos Flores-Díaz, 1986	Polen González-Quintero, 1986	Fósiles de aves Brookrop y Phillips, 1986	Fósiles de mamíferos Álvarez, 1986
5	Diatomeas ausentes	Pantano	Pantano Aguas dulces	Lago somero	Aves que anidan en tularas	
10	Pantano de agua dulce Ribera inundable	Variable pantano	Somero Incremento en salinidad Dulce y somero	Precipitación alta Pantano	Aves que anidan en tularas	Fauna moderna
15						
20	Pantano de agua dulce	Nivel variable	Nivel bajo 20-16 ka		Sin registro	Fauna moderna y pleistocénica
25	Lago / pantano salino-alcalino	Pantano	Período seco 22-23 ka	Precipitación baja		Transición
30	Lago salino profundo	Lago profundo y dulce	Lago profundo, ácido a neutro	Lago profundo	Paisaje semiárido	Fauna pleistocénica
35					Ausencia de aves que anidan en tularas	

Figura 2. Cuadro comparativo de las interpretaciones paleolimnológicas para el lago de Chalco a partir del estudio de la secuencia en Tapacoyá, cuenca de México (resultados reportados en Lorenzo y Mirambell, 1986, y Bradbury, 1989). GCB = gran ceniza basáltica, PCA = pómez con andesita, ka = miles de años.

presente (A.P.), cubriendo el período reconocido como el último máximo glacial para América del Norte (*ca.* 22,000 a 18,000 años A.P.). Este período es de particular interés en los estudios paleolimnológicos y paleoclimáticos a nivel global, debido a que han sido encontradas tendencias opuestas entre sitios como el suroeste de Estados Unidos de América (Smith y Street-Perrott, 1983), donde existieron lagos muy extensos, y zonas como Florida o África (Watts y Hansen, 1994; Street-Perrott y Roberts, 1983) en las que el máximo glacial representa un período de niveles lacustres bajos. Debido a que este patrón de distribución geográfica y temporal de niveles lacustres se ha empleado como una evidencia importante para proponer mecanismos de cambio climático global, es interesante documentar con mayor exactitud cuál fue el patrón de fluctuaciones en los niveles lacustres registrados durante este período en México.

El uso de las diatomeas como indicadores paleolimnológicos y paleoclimáticos es un método ampliamente aceptado, debido a que este grupo de algas tiene una especificidad alta a las condiciones del medio en que viven—profundidad, salinidad, conductividad eléctrica, pH—y a que en los sedimentos lacustres, usualmente, se puede preservar un gran número de sus valvas—cubiertas silíceas rígidas—que pueden ser identificadas hasta el nivel de especie. Las condiciones paleolimnológicas, como alcalinidad, salinidad, etc., a su vez son un reflejo de las condiciones ambientales locales, principalmente del balance entre dos de las variables climáticas más importantes: precipitación y evaporación (Szesztay, 1974; Street-Perrott y Harrison, 1985).

ÁREA DE ESTUDIO

La subcuenca de Chalco está delimitada al este por la sierra Nevada, al norte por la sierra de Santa Catarina, y al sur por la sierra Chichinautzin (Figura 1); el límite occidental no es tan marcado, y antiguamente estaba formado por la isla de Tláhuac, que lo separaba del lago de Xochimilco. La planicie lacustre tiene una extensión aproximada de 120 km² y una alti-

tud promedio de 2,240 m s.n.m.m. El clima del área se clasifica como templado subhúmedo (García, 1966; Cardoso y García, 1982) y se caracteriza por tener una temperatura media anual de 15.4°C y una precipitación media de 662 mm al año, la cual se concentra durante los meses del verano.

En la actualidad, Chalco se encuentra altamente modificado por el impacto humano y, al igual que la mayoría de los lagos de la cuenca, ha sufrido un proceso de desecamiento que se ha agudizado por la desviación artificial de los principales ríos que lo alimentaban—Amecameca, Tlalmanalco y San Francisco Acuatla. Además de estos ríos, el lago de Chalco recibía el aporte de arroyos que bajan por las laderas de las sierras de Santa Catarina y Chichinautzin durante la época de lluvias, y de las aguas de numerosos manantiales localizados principalmente hacia la antigua ribera meridional de Chalco. Actualmente, la parte septentrional de la planicie lacustre está cubierta por asentamientos humanos, y sólo hacia la parte sudoriental existe una zona de pantanos alcalinos de uno o dos metros de profundidad. La vegetación en el área también ha sido severamente afectada por la ocupación humana, las partes bajas son usadas para la agricultura, el piedemonte está cubierto por pastizales inducidos y algunos otros cultivos, y solamente en algunas de las zonas más altas de la sierra Chichinautzin y en la sierra Nevada, están localizadas todavía áreas cubiertas por bosques de pino y encino (Rzedowski y Rzedowski, 1979).

METODOLOGÍA

Cuatro núcleos (A–D) de 80 mm de diámetro fueron extraídos de la planicie lacustre de Chalco, empleando una perforadora tipo Livingston, no rotativa; el más largo (núcleo B) con 26.5 m de profundidad (Figura 1). El presente artículo se concentra en el estudio de la sección de este núcleo comprendida entre los 18.60 y los 5.65 m. Ortega-Guerrero (1992) realizó el estudio detallado de la secuencia estratigráfica de estos núcleos y, con base en coloración, textura y aspecto macroscópico, definió siete unidades, cuatro de las cuales (4–7) están incluidas en esta sección (Figura 3). En todos los núcleos se identificó la misma secuencia de tefras, con un total de 16 en el núcleo más largo (B); siete de ellas (VI–XII) están incluidas en esta sección (Figura 3).

Para este análisis, fueron tomadas muestras del material del núcleo B a intervalos regulares de 10 cm. Las submuestras de 0.5 g fueron sometidas a ebullición suave con ácido clorhídrico al 10% y peróxido de hidrógeno, hasta que todo resto de carbonatos o materia orgánica fue eliminado. Los residuos de los reactivos fueron eliminados, enjuagando varias veces con agua destilada y dejando decantar por 24 horas. Fueron elaboradas preparaciones permanentes tomando 200 µL de material y empleando Naphrax—resina con índice de refracción = 1.66—como medio de montaje. Las preparaciones fueron analizadas al microscopio óptico (1,250 x) para determinar las especies presentes y su abundancia relativa, mediante el conteo

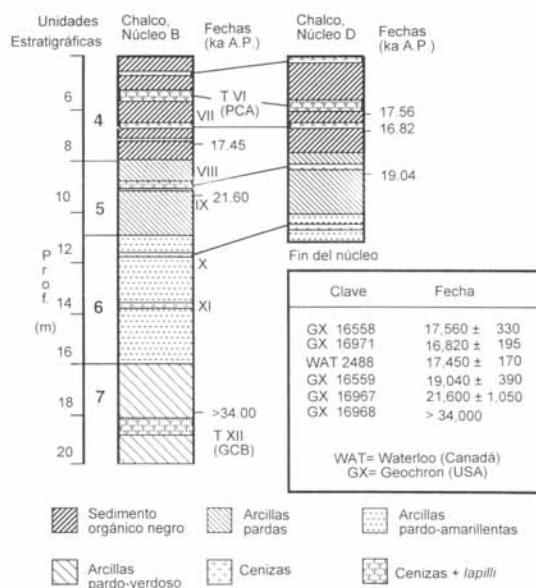


Figura 3. Fechas de ¹⁴C y estratigrafía comparada del núcleo B y el núcleo D, extraídos del lago de Chalco, cuenca de México. T: tefra, PCA: pómez con andesita, GCB: gran ceniza basáltica, ka: miles de años.

de un mínimo de 400 ejemplares (valvas). En las muestras en que el contenido de diatomeas fue muy escaso, sólo fueron contadas 100 valvas. La determinación de especies se realizó siguiendo los tratados taxonómicos de Hustedt (1930, 1959, 1960–66), Patrick y Reimer (1966, 1975), Kramer y Lange-Bertalot (1986, 1988, 1991) y Gasse (1986).

Para la interpretación paleolimnológica, las variedades de diatomeas fueron divididas, de acuerdo con su abundancia relativa, en dos categorías:

1. Especies dominantes, con abundancia relativa $\geq 30\%$.
2. Especies comunes, con abundancia relativa entre 30 y 5%.

No fueron consideradas en este análisis especies con abundancia inferior al 5%.

De acuerdo con sus afinidades ecológicas (Tabla 1), fueron divididas en cinco categorías, tomando como base la clasificación propuesta por Hustedt (1937–1938), modificada de acuerdo con los datos de la distribución de algunas especies de diatomeas en el centro de México (Caballero-Miranda, 1995):

1. **Acidófilas:** especies que prefieren medios con pH ácido (pH < 7) y muy bajo contenido de minerales disueltos (conductividad eléctrica [CE] < 100 µS/cm).
2. **Neutrófilas:** especies que prefieren medios con pH cercano a la neutralidad (pH ~ 7) y contenidos de sales disueltas relativamente bajos (**2a. bajo-neutrales**, CE ~150 µS/cm) o medios (**2b. alto-neutrales**, CE ~250 µS/cm).
3. **Alcalófilas:** especies que prefieren medios alcalinos (pH > 8) y alto contenido de sales disueltas (CE ~2,000 µS/cm).

Tabla 1. Diatomeas presentes en el núcleo B (5.65 – 18.30 m), agrupadas según preferencias ecológicas.

Categoría	Especie	Habitat
Acidófilas	<i>Aulacoseira distans</i> (Ehr.) Simon	plancton, ticoplancton
	<i>Eunotia bilunaris</i> (Ehr.) Mills	perifita
	<i>E. incisa</i> Greg.	perifita
Bajo-neutrales	<i>Achnanthes minutissima</i> Kutz.	perifita
	<i>Aulacoseira granulata</i> (Ehr.) Simon.	plancton
	<i>A. granulata</i> var. <i>angustissima</i> (O. Mull.) Simon.	plancton
	<i>Eunotia formica</i> Ehr.	perifita
	<i>E. pectinalis</i> (Dill.) Rab.	perifita
	<i>Fragilaria brevistriata</i> Grun.	ticoplancton
	<i>Fragilaria capucina</i> Desm.	ticoplancton
	<i>Fragilaria construens</i> var. <i>venter</i> (Ehr.) Hust.	ticoplancton
	<i>Fragilaria pinata</i> var. <i>lancetula</i> (Schum.) Hust.	ticoplancton
	<i>Navicula absoluta</i> Hust.	perifita
	<i>N. minima</i> Grun.	perifita
	<i>Nitzschia paleacea</i> Grun.	ticoplancton
	<i>Rhoicosphenia curvata</i> (Kutz.) Grun.	epifita, perifita
	<i>Stauroneis kriegeri</i> Patrick	perifita
	Espículas de esponjas	(bentos)
	Estatosporas (Chrysophyceae)	(plancton)
	Alto-neutrales	<i>Achnanthes hungarica</i> Grun.
<i>Cocconeis placentula</i> Ehr.		perifita, epifita
<i>Cymbella muellerii</i> Hust.		perifita
<i>Epithemia adnata</i> (Kutz.) Breb.		perifita
<i>Fragilaria pinnata</i> Ehr.		ticoplancton
<i>Gomphonema parvulum</i> (Kutz.) Kutz.		perifita
<i>Navicula veneta</i> Kutz.		perifita
<i>Nitzschia communis</i> Rab.		epifita
<i>N. fonticola</i> Grun.		perifita
<i>Stephanodiscus minutulus</i> (Kutz.) Cleve and Moll.		plancton
<i>S. niagarae</i> Ehr.		plancton
Alcalófilas	<i>Amphora ovalis</i> v. <i>affinis</i> (Kutz.) V. Heurck*	perifita, bentos
	<i>A. veneta</i> Kutz.*	perifita, bentos
	<i>Cyclotella meneghiniana</i> Kutz.*	plancton, ticoplancton, bentos
	<i>C. gamma</i> Skvortzow	ticoplancton
	<i>Navicula cryptocephala</i> Kutz.	perifita
	<i>N. laevissima</i> Kutz.	perifita
	<i>Nitzschia amphibia</i> Grun.	epifita, perifita
	<i>Nitzschia frustulum</i> (Kutz.) Grun.*	ticoplancton
	<i>N. liebetruthii</i> Rab.*	ticoplancton
	<i>Rhopalodia gibberula</i> (Ehr.) O. Mull.	perifita, bentos
<i>Surirella</i> spp.	bentos	
Halófilas	<i>Anomoeoneis sphaerophora</i> f. <i>costata</i> (Kutz.) Schmid	perifita, bentos
	<i>Campylodiscus clypeus</i> Ehr.	bentos
	<i>Chaetoceros muelleri</i> Lemmermann	plancton
	<i>Cymbella pusilla</i> Grun	ticoplancton, perifita

Esta tabla está basada en información recolectada por la autora y la publicada por otros autores, principalmente Gasse (1980).

Especies con abundancia <5% no incluidas; * = especies tolerantes a condiciones salobres; plancton = suspendida en columna de agua; bentos = fija a un sustrato sumergido; perifita = fija a un sustrato en ambiente litoral; epifita = fija a vegetación; ticoplancton = normalmente fija a un sustrato pero puede entrar en el plancton.

4. Halófilas: especies que prefieren medios salobres, normalmente con pH alcalino (pH > 8) y con alto contenido en minerales disueltos (CE > 2,000 µS/cm).

MARCO CRONOLÓGICO

La sección estudiada está definida por dos tefras: la T VI (5.65–5.85 m) en la parte superior y la T XII (18.30–18.60 m) en la inferior. Para esta sección, se cuenta con tres fechamientos de radiocarbono, además de otros cuatro realizados en material proveniente del núcleo D (Figura 3). Los tres fechamientos del núcleo B son concordantes estratigráficamente, no así los provenientes del núcleo D, en los que una de las fechas (GX 16558) se encuentra estratigráficamente invertida.

El sedimento que yace sobre la tefra XII fue fechado en >34,000 A.P. (GX 16968). Esta fecha sólo da una edad mínima para esta tefra, pero, junto con la evidencia estratigráfica, permite correlacionar esta capa de cenizas y lapilli de color negro con la llamada “gran ceniza basáltica” (GCB), que forma la base de la secuencia estratigráfica en Tlapacoya. En este sitio arqueológico, a las orillas del lago de Chalco, la GCB fue fechada en 33,500 +3,200/-2,300 (Lorenzo y Mirambell, 1986). Lo anterior permite fijar la edad de base de la secuencia consignada en aproximadamente 34,000 años A.P.

El fechamiento de la tefra superior, T VI, resulta algo incierto. El sedimento que yace bajo esta tefra fue fechado en el núcleo D en 17,560 ± 330 años A.P. (GX-16558); sin embargo, este valor resulta alto si se compara con los dos fechamientos subsiguientes (Figura 3). Estas fechas y lo conspicio de esta capa, formada por fragmentos gruesos de lapilli pumítico blanco-amarillento, permiten asociar la T VI con la llamada “pómez con andesita” (PCA) de la secuencia en Tlapacoya. En este sitio, varios fechamientos dan a esta tefra una edad entre 14,430 ± 190 y 15,020 ± 450 años A.P. (Lorenzo y Mirambell, 1986). A pesar de que las fechas obtenidas para el núcleo D sugieren una edad algo superior para esta tefra (cf. Lozano-García *et al.*, 1993), en el presente trabajo se asociará al límite superior de la secuencia estudiada una edad de entre ca. 15,000 y 14,500 años A.P. El resto de las fechas es estratigráficamente congruente y correlacionable entre los núcleos B y D (Figura 3).

RESULTADOS Y RECONSTRUCCIÓN PALEOLIMNOLÓGICA

Con base en la estratigrafía de diatomeas, la sección de estudio se puede dividir en cuatro partes (Figura 4): las dos partes inferiores (18.5 a 16 y 16 a 11 m), en las cuales dominan especies alcalófilas (*Nitzschia frustulum* y *Cyclotella meneghiniana*); la parte media-superior (11 a 8 m), en la que dominan variedades neutrófilas (*Cocconeis placentula*); y la parte superior (8 a 5.8), en la que alternan especies neutrófilas con especies acidófilas (*Eunotia bilunaris*, *E. incisa*) y estatosporas de algas Crisofitas (Chrysophyceae).

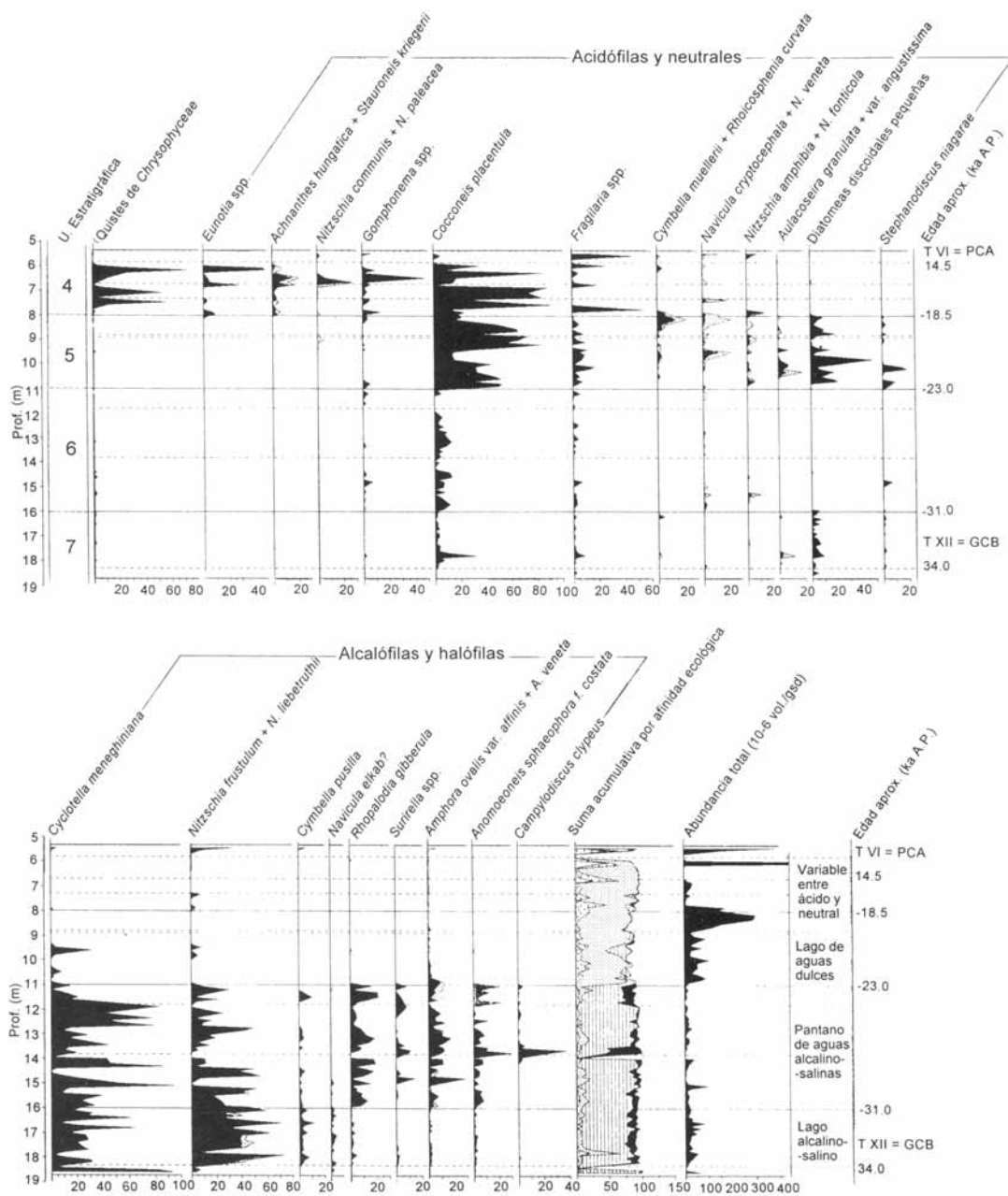


Figura 4. Estratigrafía de diatomeas del núcleo B (5.65–18.6 m), lago de Chalco, cuenca de México, entre ca. 34,000 y 15,000 años A.P. Líneas discontinuas: tefra; áreas sombreadas: segunda especie en el encabezado; ka: miles de años. Suma acumulativa por afinidad ecológica de acuerdo a la siguiente clave: áreas blancas: acidófilas; áreas con líneas discontinuas verticales: bajo-neutrales; áreas punteadas: alto-neutrales; áreas con líneas continuas verticales: alcalófilas; áreas negras: halófilas.

Asumiendo tasas de sedimentación constantes entre las fechas disponibles, fueron calculadas las fechas aproximadas que delimitan cada zona (Figura 4): la más antigua entre ca. 34,000 y 31,000 años A.P., la siguiente entre ca. 31,000 y 23,000 años A.P., la intermedia-superior entre ca. 23,000 y 18,500 años A.P. y la más reciente entre ca. 18,500 y 15,000 / 14,500 años A.P.

34,000–31,000 A.P.

A lo largo de este intervalo, las diatomeas presentes son principalmente alcalófilas. *Nitzschia frustulum* y *Cyclotella meneghiniana* dominan el conjunto (Figura 4) y las diatomeas comunes incluyen a *Cymbella pusilla* y *Navicula elkab.* También son comunes las especies neutrófilas como *Cocconeis placentula* y *Stephanodiscus niagarae*, así como dos especies de diatomeas discoideales pequeñas. Estas dos últimas tentativamente son identificadas como *Stephanodiscus astreae* var. *minutula* (Kütz.) Grun. (sinónimo: *S. minutulus* [Kütz.] Cleve y Möller) y *S. asteroides* var. *intermedia* Gasse (sin.: *S. oregonica* [Ehr.] Håkansson) ya que, bajo el microscopio óptico, su aspecto se asemeja a estas variedades según son descritas por Gasse (1980, lám. 17, núms. 6–7 y 18–19, respectivamente).

Este conjunto de diatomeas indica que, durante este intervalo, Chalco era un lago de profundidad moderada, con aguas turbias, alcalino-salinas. Asociaciones muy similares de diatomeas han sido encontradas en el este de África, en lagos alcalino-salinos en los cuales sodio, carbonatos y bicarbonatos son los iones disueltos dominantes (Hecky y Kilham, 1973; Gasse et al., 1983).

31,000–23,000 A.P.

Las especies de diatomeas que dominan durante este intervalo son las mismas del período anterior (*Nitzschia frustulum* y *Cyclotella meneghiniana*). Las especies comunes, sin embargo, son bastante diferentes. Especies como las diatomeas discoideales (*Stephanodiscus*) están ausentes, mientras que otras especies, generalmente asociadas a ambientes más someros y salobres, como *Campylodiscus clypeus*, *Rhopalodia gibberula*, *Amphora ovalis* var. *affinis* y *Anomoeoneis sphaerophora* f. *costata*, aparecen o incrementan su abundancia (Figura 4).

Esta asociación de diatomeas sugiere que, durante este intervalo, el lago de Chalco experimentó una reducción en el nivel lacustre, así como un incremento en la concentración y turbiedad de sus aguas. El incremento en abundancia de varias especies que son consideradas como bentónicas—*Anomoeoneis sphaerophora* f. *costata*, *Amphora ovalis* var. *affinis* o *Rhopalodia gibberula*—(Gasse et al., 1983; Gasse, 1986) indica que durante este intervalo, la vegetación acuática y subacuática del lago debió haber sido poco abundante.

23,000–18,500 A.P.

Durante este período, las especies neutrófilas pasan a ser dominantes. *Cocconeis placentula* domina el conjunto, y entre las formas comunes, se encuentra *Fragilaria* spp., *Stephanodiscus niagarae* y las dos especies de diatomeas discoideales pequeñas (Figura 4). Este cambio indica una modificación drástica del ambiente lacustre en relación con la fase anterior. El medio alcalino-salobre se transformó en un ambiente de aguas dulces, menos concentrado y con pH cercano a la neutralidad. *C. placentula*, por ser una variedad epifita, también indica la presencia de abundante vegetación acuática y subacuática. Las especies comunes, algunas de ellas planctónicas o planctónicas facultativas, como *Stephanodiscus niagarae*, *Aulacoseira granulata* y su variedad *angustissima* y las dos especies de diatomeas discoideales, sugieren que durante esta fase el lago tuvo mayor profundidad que en la fase anterior. La parte inicial de este período parece haber sido más profunda, ya que bajo el nivel de 9.5 m (ca. 21,000 años A.P.), las especies planctónicas son más abundantes; y arriba de este nivel, *Navicula veneta*, una especie de ambientes más someros, incrementa su abundancia. De acuerdo con lo anterior, durante este período Chalco fue un lago de aguas dulces y de profundidad moderada, con abundante vegetación acuática y subacuática. Se puede distinguir, además, una fase inicial en la que los niveles lacustres fueron más profundos, entre ca. 23,000 y 21,000 años A.P., y una fase final, con niveles levemente más bajos, entre ca. 21,000 y 18,500 años A.P.

18,500–14,500 A.P.

Durante este intervalo, *C. placentula* sigue siendo muy abundante, pero se presentan varios eventos en los cuales especies acidófilas y neutrófilas llegan a dominar el conjunto (Figura 4). La presencia abundante de estatosporas de Crisofitas (Chrysophyceae), con un patrón de distribución similar al de las diatomeas acidófilas, es característica de esta etapa.

La presencia de diatomeas de distintos tipos—acidófilas y neutrófilas—en una misma muestra y las fluctuaciones tan marcadas entre ellas dificultan la interpretación paleolimnológica para esta zona. Aparentemente, durante este período, Chalco sufrió fluctuaciones relativamente rápidas entre ambientes neutros y ácidos. La ausencia de diatomeas planctónicas o facultativamente planctónicas—como *Stephanodiscus niagarae*, *Aulacoseira granulata* y su variedad *angustissima* o las dos especies de diatomeas discoideales pequeñas—indica que durante esta fase la profundidad fue menor, por lo que se considera que Chalco pasó por una etapa palustre.

DISCUSIÓN

Al comparar la zonación derivada del estudio de diatomeas con las unidades estratigráficas definidas, se observa

una buena correlación (Figura 4), ya que las principales fluctuaciones en el registro de diatomeas coinciden con los cambios estratigráficos entre unidades. Por otro lado, es interesante observar que algunas variaciones en el contenido de diatomeas parecen estar ligadas a la presencia de tefras:

- En general se registra una marcada disminución en la abundancia total de diatomeas en los niveles de tefra, sobre todo en las tefras T XII (GCB), T XI y T VI (PCA) (Figura 4). En estos niveles, las diatomeas están completamente ausentes. Por el contrario, las tefras T VIII y T VIIa parecen tener muy bajo efecto sobre este parámetro, lo que sugiere que éstas sean horizontes de tefra re trabajados.
- A partir de la Figura 4, se puede observar que hay un marcado incremento en la abundancia de algunas de las variedades halófilas (como *Anomooneis sphaerophora* f. *costata*, *Campylodiscus clypeus*) asociado a la presencia de la tefra T XI.
- Durante el período de depósito de la parte superior de la sección analizada, donde abundan las estatosporas de Crisofitas y las diatomeas de ambientes ácidos, la actividad volcánica parece haber sido más intensa, como lo sugiere el número abundante de tefras que está presente. Parece haber, además, una correlación entre la distribución de las tefras y los niveles con número máximo de estatosporas y diatomeas acidófilas (Figura 4).

Estas correlaciones son interesantes, pero difíciles de evaluar a partir del registro paleolimnológico, debido a que, entre otras complicaciones, se debe considerar que varios tipos de manifestaciones volcánicas, como escape de gases o actividad hidrotermal, pueden modificar de manera importante las condiciones lacustres, sin dejar una huella clara en la secuencia estratigráfica. La correlación aparente entre la presencia de tefras y las variaciones en el registro de diatomeas y estatosporas, se podría atribuir a diferentes causas: (i) a un efecto de sucesión ecológica después de la caída de cenizas; (ii) a una alteración en las condiciones químicas del lago debida a la caída de cenizas; (iii) a una variación en las condiciones ambientales provocada por la actividad volcánica (e.g., hidrotermalismo, efecto de lluvia ácida, etc.). Finalmente, se debe considerar que estas variaciones puedan ser totalmente independientes de la actividad volcánica y que sean debidas a otros factores, como, por ejemplo, variaciones rápidas en los regímenes de precipitación. Por el momento, no se cuenta con elementos suficientes que favorezcan alguna de estas posibilidades o que permitan explicar más claramente estos patrones de distribución.

CORRELACIÓN CON LA SECUENCIA DE TLAPACOYA

Las investigaciones en Tlapacoya fueron de tipo multidisciplinario, debido a que diversos especialistas analizaron esta secuencia: Limbrey estudió suelos y sedimentos; Lambert, tefras; Lidicoat y Coe, paleomagnetismo; Flores-Díaz, suelos,

sedimentos y algunos microfósiles; González-Quintero, polen; Bradbury, diatomeas; Álvarez, restos óseos de mamíferos; y Brodkrop y Phillips, restos óseos de aves; todos ellos con el propósito de obtener información que permitiera establecer las variaciones limnológicas y climáticas del área (resultados consignados en Lorenzo y Mirambell, 1986 y Bradbury, 1989, entre otros artículos).

Limbrey, Flores-Díaz, González-Quintero y Bradbury realizaron, independientemente, interpretaciones paleolimnológicas a partir de sus respectivos estudios (también describen inferencias paleoclimáticas pero éstas no serán abordadas en el presente artículo). Estas interpretaciones no son, sin embargo, del todo congruentes entre sí (Figura 2). A pesar de esto, se puede detectar dos elementos en común:

- i. Estos autores consideran que el nivel fechado en 33,000 años A.P. corresponde a la etapa de máxima profundidad lacustre en este registro. Brodkrop y Phillips describen, además, abundantes restos de aves provenientes de una capa que yace sobre la GCB (33,000 años A.P.), para la cual la ausencia de especies que anidan en tulares y la presencia de aves como alcatraces fueron interpretadas como un índice de que en ese momento el lago de Chalco era abierto (con escasa vegetación acuática y subacuática) y con una profundidad suficiente para sostener una población considerable de peces.
- ii. Estos autores consignan también que el cambio más importante en los registros que analizan se localiza en los niveles fechados entre ca. 23,000 y 22,000 años A.P. (sólo Bradbury considera que este cambio ocurrió en una fecha ligeramente anterior, cerca de los 24,000 años A.P.). Flores-Díaz y Limbrey sugieren, además, que este cambio fue precedido por un período de disminución en el nivel lacustre. Álvarez también detecta un cambio en el tipo de fauna a ese nivel: especies modernas, si bien no características del área en el presente—oso negro—aparecen en el registro fósil.

Estos dos puntos son confirmados, de manera general, por el registro de diatomeas del núcleo B, pero se aporta nuevos datos que dan información más detallada sobre la naturaleza de estos dos eventos. En relación con el primer punto, el registro de diatomeas del núcleo B sugiere que el lago de Chalco era más profundo a los 33,000 que posteriormente, entre los 31,000 y 23,000 años A.P., cuando pasó por una fase muy somera. Sin embargo, el conjunto de diatomeas presente no sugiere la presencia de un lago particularmente profundo, y no es consistente con los 15 m de profundidad que sugiere González-Quintero.

Calcular la máxima profundidad que Chalco pudo haber alcanzado es una tarea difícil. Si se toma en cuenta que en 1876—antes de los problemas de hundimientos en la cuenca— el piso de Chalco tenía una altitud de 2,239 m s.n.m.m. (Marsal y Masari, 1959), y que dentro de los niveles de playa reportados para Tlapacoya el de mayor altitud yace entre los 2,248 a 2,246 m s.n.m.m. (Lorenzo y Mirambell, 1986; Bradbury,

1989), la máxima profundidad probable para el lago de Chalco es de 9 m. Durante el intervalo estudiado, sin embargo, las diatomeas indican que el lago no estuvo lleno a su máxima capacidad, por lo que se sugiere que pudiera haber alcanzado un máximo de 5 ó 6 m de profundidad antes de los 31,500 años A.P. Durante el período somero posterior (ca. 31,500 a 23,000 A.P.), el lago no debió haber tenido más de uno o dos metros de profundidad.

En lo tocante al segundo punto, en el registro de diatomeas del núcleo B también es notorio que sí existe un cambio brusco alrededor de los 23,000 años A.P. (Figura 4), con una transición de medios alcalino-salinos a dulceacuícolas. Es muy interesante observar que para el sitio de Tlapacoya, se registra en los niveles fechados en ca. 23,000 a 22,000 años A.P., la presencia de tres hogares y diversos utensilios líticos (Lorenzo y Mirambell, 1986). Es probable que poblaciones humanas hayan entrado al área de Chalco después de que éste dejó de ser un pantano alcalino-salino, y se convirtió en un lago dulce.

Bradbury (1989) explica esta transición gracias a un descenso general de los niveles lacustres en la cuenca de México, cerca de los 24,000 años A.P., cuando considera que se interrumpió la influencia del lago de Texcoco, que favorecía las condiciones alcalino-salinas en el lago de Chalco. Esta interpretación, sin embargo, no es consistente con el registro de diatomeas del núcleo B, que indica que Chalco era ya un sistema muy somero, muy probablemente independiente de Texcoco, desde los ca. 31,000 años A.P., y que la transición hacia ambientes dulceacuícolas involucró un incremento en las formas planctónicas que indican un aumento en el nivel del lago. Una interpretación más factible para explicar el establecimiento de las condiciones dulceacuícolas en Chalco es que, al incrementarse los niveles lacustres en el área hace ca. 23,000 años, este lago empezó a drenar hacia Texcoco, favoreciendo la eliminación rápida de sales y el establecimiento de la fase de aguas dulces en Chalco.

A pesar de estas divergencias en la interpretación de la secuencia paleolimnológica de Chalco, la estratigrafía de diatomeas descrita por Bradbury (1989) para Tlapacoya se correlaciona muy estrechamente con la del núcleo B. Las diatomeas alcalófilas dominan en la parte baja de la secuencia, intercaladas y sobre la GCB, con algunas especies halófilas—*Anomoeoneis costata* y *Campylodiscus clypeus*—aumentando su abundancia en los niveles que yacen sobre dicha ceniza. Las especies dulceacuícolas sólo se presentan en los niveles intermedios entre la GCB y la PCA, y en los niveles directamente debajo de la PCA dominan las especies aerófilas—características de ambientes muy someros y de suelos húmedos.

CONCLUSIONES

A partir de los datos presentados, y tomando en consideración la discusión anterior, se puede concluir lo siguiente:

1. Entre 34,000 y 31,000 años A.P., Chalco fue un lago abierto (con poca vegetación acuática) y con aguas alcalino-salobres (pH ~ 8, CE ~ 2,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$).
2. Entre 31,000 y 23,000 años A.P., el lago registró una baja de nivel y pasó a ser un pantano de aguas alcalino-salobres (pH > 8, CE > 2,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, profundidad probable no mayor que 1 ó 2 m).
3. A los 23,000 años A.P., ocurrió un cambio muy importante en las condiciones paleolimnológicas de Chalco, de un ambiente somero alcalino-salobre a un lago de aguas dulces. De acuerdo con los resultados reportados para la secuencia en Tlapacoya (Lorenzo y Mirambell, 1986), esta transición pudo haber sido consecuencia de un cambio de carácter general en el área, que no sólo afectó al lago, sino que dejó sentir sus efectos, tanto en la fauna como en la flora, y que parece coincidir con la entrada de los primeros seres humanos a la cuenca de México.
4. Entre los 23,000 y 18,500 años A.P., Chalco fue un lago de profundidad moderada y de aguas dulces, con abundante vegetación acuática y subacuática. Se distinguen dos fases, la inicial (ca. 23,000–21,000 años A.P.), levemente más profunda que la final (ca. 21,000–18,500 años A.P.) (pH ~ 7, CE ~ 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$).
5. Después de los 18,500 años A.P., y por lo menos hasta el nivel de la PCA (ca. 14,500 a 15,000 años A.P.), el lago pasó por una nueva transición en la que el nivel lacustre disminuyó. La naturaleza de este período es incierta; aparentemente hubo oscilaciones rápidas entre ambientes neutros y ácidos, probablemente asociadas a la elevada actividad volcánica registrada durante este período.

El comportamiento del lago de Chalco, alrededor del UMG para América del Norte, está marcado por una tendencia a la disminución del nivel del lago, que es interrumpida a los 23,000 años A.P., cuando se registra un nivel lacustre relativamente alto. Después de los 18,500 A.P., sin embargo, se vuelve a establecer un nivel lacustre relativamente bajo. Esta secuencia no correlaciona con la reportada para los lagos del sudoeste de Estados Unidos de América, donde están registrados niveles lacustres altos (Smith y Street-Perrott, 1983). El comportamiento del lago de Chalco durante el UMG es más parecido al descrito para sitios como Florida o África, donde este período corresponde a una fase de niveles lacustres bajos (Watts y Hansen, 1994; Street-Perrott y Roberts, 1983). En Chalco, no obstante, la tendencia hacia niveles lacustres bajos es interrumpida cerca del máximo glacial (ca. 23,000 a 18,500 A.P.), una señal que no corresponde a lo descrito para Florida o África.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue apoyada por la UNAM, a través del proyecto IN103589 de la DGAPA y de una beca para estudios doctorales otorgada a la autora. Los núcleos fueron extraídos en colaboración con la Universidad de Trier y con apoyo

parcial de la Fundación Volkswagen. Los fechamientos con clave GX fueron procesados en los laboratorios Geochron, de Kruger Enterprises, en E.U.A., como parte de su Programa de Apoyos a la Investigación 1991, otorgado a la Dra. Beatriz Ortega-Guerrero. Los fechamientos con clave WAT fueron procesados en la Universidad de Waterloo, gracias al Dr. Barry Warner. La autora desea agradecer el constante apoyo de los doctores Jaime Urrutia-Fucugauchi, Socorro Lozano-García y Sarah Metcalfe durante la realización de este trabajo, y a Susana Sosa y Teodoro Hernández por su apoyo técnico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bradbury, J.P., 1971, Paleolimnology of Lake Texcoco, Mexico—evidence from diatoms: *Limnology and Oceanography*, v. 16, núm. 2, p. 180–200.
- 1989, Late Quaternary lacustrine paleoenvironments in the Cuenca de México: *Quaternary Science Reviews*, v. 8, núm. 1, p. 75–100.
- Caballero-Miranda, M.E., 1995, Late Quaternary palaeolimnology of Lake Chalco, the Basin of Mexico: Inglaterra, Universidad de Hull, disertación doctoral, 286 p. (inédita).
- Cardoso, M.D., y García, Enriqueta, 1982, Vegetation and climate in the Basin of Mexico—geographical topics of Mexico City and its environs: *International Geophysical Union, Latin American Regional Conference, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía*, p. 19–24 (recopilación).
- Clisby, K.H., y Sears, P.B., 1955, Palynology in southern North America; Part 3, Microfossil profiles under Mexico City correlated with the sedimentary profiles: *Geological Society of America Bulletin*, v. 66, núm. 5, p. 551–520.
- García, Enriqueta, 1966, Los climas del Valle de México según el sistema de clasificación climática de Koeppen modificado por la autora: *International Geophysical Union, Conferencia Regional Latinoamericana, Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística, Simposio sobre el Valle y la Ciudad de México, México, D.F.*, p. 27–48 (recopilación).
- Gasse, Françoise, 1980, Flore des diatomées lacustres Plio-Pléistocènes du Gadeb (Éthiopie)—système, paléocologie, biostratigraphie: *Revue Algologique, Memoire hors-série*, núm. 3, 249 p.
- 1986, East African diatoms—Taxonomy, ecological distribution: *Berlin, Stuttgart, ed. J. Cramer, in der Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung*, v. 11, 202 p. + XLIV láminas.
- Gasse, Françoise; Talling, J.F.; y Kilham, Peter, 1983, Diatom assemblages in east Africa—classification, distribution and ecology: *Révue du Hydrobiologie Tropicale, ORSTOM*, v. 16, núm. 1, p. 3–34.
- González-Quintero, Lauro, 1986, Análisis polínicos de los sedimentos, in Lorenzo, J.L., y Mirambell, Lorena, eds., Tlapacoya, 35,000 años de historia del lago de Chalco: México, D.F., Instituto Nacional de Antropología e Historia, Colección Científica, Prehistoria, p. 157–166.
- González-Quintero, Lauro, y Fuentes-Mata, Macrina, 1980, El Holoceno de la porción central de la cuenca del Valle de México: Instituto Nacional de Antropología e Historia, *Memorias del Coloquio sobre Paleobotánica y Palinología*, 3, México, D.F., Colección Científica, Prehistoria, núm. 86, p. 113–132.
- Hecky, R.E., y Kilham, Peter, 1973, Diatoms in alkaline, saline lakes—ecology and geochemical implications: *Limnology and Oceanography*, v. 18, núm. 1, p. 53–71.
- Hustedt, Friedrich, 1930, Bacillariophyta (Diatomeae), in A. Pascher, ed., *Die Süßwasser—Flora Mitteleuropas*, v. 10, 466 p., 875 figs. (reeditado en 1991 por Koeltz Scientific Books, Champaign, Illinois, en tres volúmenes).
- 1937–38, Systematische und Ökologische Untersuchungen über die Diatomeenflora von Java, Bali und Sumatra: *Archiv für Hydrobiologie* (reeditado en 1980 por Koeltz Scientific Books, Champaign, Illinois).
- 1959, Die Diatomeenflora des Neusiedler Sees im österrischeischen Burgenland: *Ost. Bot. Z.*, v. 106, núm. 5, p. 390–430 (reeditado en 1991 por Koeltz Scientific Books, Champaign, Illinois, en tres volúmenes).
- 1960–66, Die kieselalgen Deutschlands, Österreichs und der Schweiz, in L. Rabenhorst, ed., *Kryptogamen Flora von Deutschland, Österreich und der Schweiz*: Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft mb. H., parte 3, 816 p. (reeditado en 1991 por Koeltz Scientific Books, Champaign, Illinois, en tres volúmenes).
- Kramer, K., y Lange-Bertalot, H., 1986, 1988, 1991, Süßwasserflora von Mitteleuropa 2—Bacillariophyceae 2/1 – 2/3: Nueva York, Gustav Fisher Verlag.
- Lorenzo, J.L., y Mirambell, Lorena, eds., 1986, Tlapacoya, 35,000 años de historia del lago de Chalco: México, D.F., Instituto Nacional de Antropología e Historia, Colección Científica, Prehistoria, 297 p.
- Lozano-García, M.S., 1989, Palinología y paleoambientes pleistocénicos de la cuenca de México: *Geofísica Internacional (México)*, v. 28, núm. 2, p. 262–335.
- Lozano-García, M.S.; Ortega-Guerrero, Beatriz; Caballero-Miranda, M.E.; y Urrutia-Fucugauchi, Jaime, 1993, Late Pleistocene and Holocene paleoenvironments of Chalco lake, central Mexico: *Quaternary Research*, v. 40, núm. 3, p. 332–342.
- Lozano-García, M.S., y Ortega-Guerrero, Beatriz, 1994, Palynological and magnetic susceptibility records of Lake Chalco, central Mexico: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 109, núms. 2–4, p. 177–191.
- Marsal, R.J., y Mazari, Marcos, 1959, El subsuelo de la Ciudad de México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, v. 1., 377 p.
- Ortega-Guerrero, Beatriz, 1992, Paleomagnetismo, magnetoestratigrafía y paleoecología del Cuaternario tardío en el lago de Chalco, cuenca de México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Unidad Académica de los Ciclos Profesional y de Posgrado del Colegio de Ciencias y Humanidades, disertación doctoral, 171 p. (inédita).
- Patrick, Ruth, y Reimer, C.W., 1966, The diatoms of the United States exclusive of Alaska and Hawaii: *Monographs of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, núm. 13, v. 1, 688 p.
- 1975, The diatom flora of the United States exclusive of Alaska and Hawaii: *Monographs of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, núm. 13, v. 2, parte 1, 213 p.
- Rzedowski, J., y Rzedowski, G.C., 1979, Flora fanerogámica del Valle de México: México, D.F., Compañía Editorial Continental, S.A., v. 1, 403 p.

- Smith, G.I., y Street-Perrott, F.A., 1983, Pluvial lakes of the western United States, *in* Porter, S.C., y Wright, H.E., Jr., eds., Late Quaternary environments of the United States—The late Pleistocene: Minneapolis, University of Minnesota Press, v. 1, p. 190–212.
- Street-Perrott, F.A., y Harrison, S.P., 1985, Lake-levels and climate reconstruction, *in* Hecht, A.D., ed., Palaeoclimate analysis and modeling: Nueva York, John Wiley and Sons, p. 219–340.
- Street-Perrott, F.A., y Roberts, Neil, 1983, Fluctuations in closed-basin lakes as an indicator of past atmospheric circulation patterns, *in* Street-Perrott, F.A.; Beran, M.A.; y Ratcliffe, R.A.S., eds., Variations in the global water budget: Dordrecht, Netherlands, Reidel Publishing Co., Hingham, p. 331–345.
- Szesztay, K., 1974, Water balance and water level fluctuations of lakes: Hydrological Sciences, Bulletin des Sciences Hydrologiques, v. 19, núm. 1, p. 73–84.
- Watts, W.A., y Hansen, B.C.S., 1994, Pre-Holocene and Holocene pollen records of vegetation history from the Florida peninsula and their climatic implications: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, v. 109, núms. 2–4, p. 163–176.
- Manuscrito recibido: 6 de marzo de 1996.
Manuscrito corregido devuelto por el autor: 6 de enero de 1997.
Manuscrito aceptado: 20 de enero de 1997.