

HISTORIA AMBIENTAL DE UN LAGO ALPINO EN EL CENTRO DE MÉXICO (1230-2010)

Estela Cuna¹, Margarita Caballero^{1*}, Edyta Zawisza^{1,2} y Carolina Ruiz³

¹Laboratorio de Paleolimnología, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Deleg. Coyoacán, C.P. 04510, México, D.F., México.

²Instituto de Ciencias Geológicas, Academia Polaca de Ciencias, Twarda 51/55, C.P. 0818, Varsovia, Polonia. ³Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Unidad Mazatlán, Universidad Nacional Autónoma de México, J. Montes Camarena s/n, Mazatlán, C.P. 82040, Sinaloa, México.
E-mail: *maga@geofisica.unam.mx

RESUMEN

Los lagos de alta montaña, con una baja mineralización, alcalinidad y contenido de nutrientes, son ecosistemas sensibles a perturbaciones naturales o antropogénicas y en la actualidad están amenazados por el calentamiento global. En México existen dos lagos de alta montaña (> 3,800 m snm): La Luna y El Sol, en el cráter del Nevado de Toluca. Análisis de parámetros químicos y de diatomeas en sedimentos superficiales permiten identificar que La Luna es más ácido y menos mineralizado que El Sol y que a pesar de su proximidad geográfica cada lago tiene un conjunto de diatomeas característico, con menor abundancia y riqueza específica en La Luna. En este lago dominan *Encyonema perpusillum* y *Psammothidium helveticum* y en El Sol *Cavinula pseudoscutiformis*, *Psammothidium levanderi* y *Aulacoseira distans*. Con base en esta distribución se interpreta el registro de diatomeas de una secuencia sedimentaria de La Luna, de 57 cm, fechada con ²¹⁰Pb y ¹⁴C en la que también se realizaron análisis de contenido de cladóceros y de susceptibilidad magnética. Todos estos indicadores permiten ubicar el inicio de una tendencia hacia climas secos y fríos alrededor de los años 1350 y 1510, que corresponde a la Pequeña Edad de Hielo (PEH), la cual tiene su máxima expresión entre los años 1660 y 1760, durante el mínimo de actividad solar de Maunder. Las características ambientales de sequía y frío se observan hasta principios del siglo XX. La comparación de este registro con otros disponibles permite concluir que durante la PEH hubo una tendencia regional en el centro de México hacia climas secos.

Palabras Clave: centro de México, diatomeas, paleolimnología, Pequeña Edad de Hielo.

Environmental history of an alpine lake in central Mexico (1230-2010)

ABSTRACT

High altitude lakes, with a low mineralization, alkalinity and nutrient levels, are sensitive ecosystems to natural or anthropogenic disturbances and currently are in risk due to global warming. There are only two high altitude lakes (> 3,800 m asl) in Mexico, La Luna and El Sol, in the Nevado de Toluca crater. Chemical parameters and surface sediment diatom assemblages show differences between both lakes, La Luna has lower pH and mineralization, and in spite of their geographic proximity, each lake has a characteristic diatom assemblage, with lower diatom concentration and species richness in La Luna. In this lake *Encyonema perpusillum* and *Psammothidium helveticum* are dominant while in El Sol are *Cavinula pseudoscutiformis*, *Psammothidium levanderi* and *Aulacoseira distans*. This ecological distribution is the basis for the interpretation of the diatom record from La Luna, from a 57 cm long core dated with ²¹⁰Pb y ¹⁴C for which cladocera and magnetic susceptibility data are also available. These proxies allowed identifying the beginning of a trend towards colder and dryer climates around 1350-1510. This period correlates with the Little Ice Age (LIA) in which the coldest and driest conditions were from 1660 to 1760, during the Maunder solar minimum. Cooler and drier conditions are recorded until the beginning of the 20th century. Correlation with other paleoenvironmental records show that there was a regional trend to drier climates during the LIA in central Mexico.

Key Words: central Mexico, diatoms, paleolimnology, Little Ice Age.

INTRODUCCIÓN

Los lagos de alta montaña se definen por localizarse por encima de la línea de crecimiento de la vegetación arbórea, a altitudes en las que la temperatura media de verano es menor a los 10°C. Debido a su ubicación geográfica, en la cima de las altas montañas, sus climas son fríos y sus principales aportes de agua provienen de la atmósfera, ya sea directamente como precipitación o indirectamente como deshielo. Esto les confiere características limnológicas particulares, ya que en general son lagos de aguas frías, saturadas de oxígeno, poco mineralizadas, de moderada alcalinidad y con un bajo contenido de nutrientes (oligotróficos). En relación a estas características son ecosistemas sensibles a la perturbación ya sea por causas naturales o antropogénicas. Además, el estudio de estas perturbaciones es más directo en este tipo de lagos, ya que no están afectados por respuestas complejas del suelo y la vegetación ni por alteraciones asociadas con la presencia del hombre. Sin embargo, en la actualidad, están amenazados por el calentamiento global, que puede alterar las condiciones de temperatura reinantes en su entorno y con ello modificar sus características físicas, químicas y biológicas. Las diferencias en temperatura entre periodos cálidos y fríos pueden afectar

fuertemente la duración de la cubierta de hielo o nieve¹ y los niveles de agua, modificando la química del agua del lago, la duración del periodo de crecimiento y la composición de la flora y fauna. Es por ello que son lugares idóneos para estudios limnológicos y paleolimnológicos, encaminados a comprender las reacciones de los ecosistemas a la perturbación natural y/o antropogénica^{2,3}.

En México sólo existen dos lagos de alta montaña (por arriba de los 3,800 m snm): La Luna y El Sol, ambos dentro del cráter del volcán Nevado de Toluca (Figura 1). En este artículo presentamos datos de química del agua y distribución de diatomeas en ambos lagos en la actualidad, así como datos de susceptibilidad magnética y bioindicadores (diatomeas y cladóceros) analizados en una secuencia sedimentaria de La Luna que abarca los últimos 800 años y que permite documentar las variaciones que este lago ha experimentado como consecuencia del cambio climático natural durante este tiempo, en particular durante la anomalía climática fría conocida como la Pequeña Edad de Hielo (PEH).

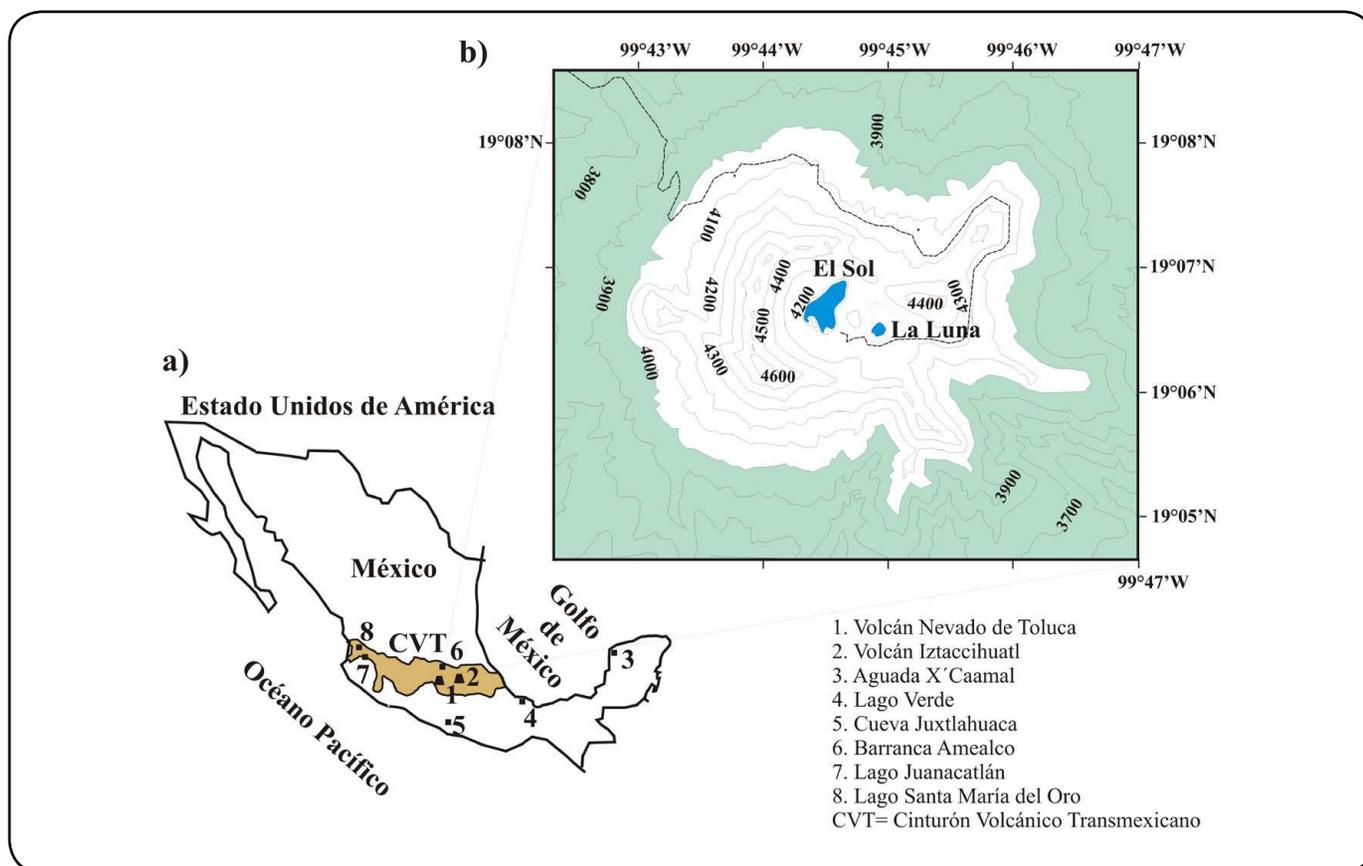


Figura 1. Mapas de localización. 1a) Localización del Nevado de Toluca y de los demás registros mencionados en el texto. 1b) Localización de los lagos La Luna y El Sol dentro del cráter del Nevado de Toluca, centro de México.

DESCRIPCIÓN DEL SITIO

El volcán Nevado de Toluca (19°07'N y 99°45'O) o Xinantecatl ("El hombre desnudo", en náhuatl), es uno de los cuatro volcanes más altos del país (4,680 m s.n.m.). Es un estratovolcán de composición andesítica-dacítica⁴ que tiene un cráter en su cima dentro del cual se ubican dos lagos (4,200 m s.n.m.); La Luna y El Sol, separados por un pequeño montículo rocoso conocido como el Ombligo (Fig. 1). La cima del Nevado de Toluca tiene un clima frío de montaña (ETH⁵) con una temperatura media anual de 3.8°C, precipitación anual de 1,213 mm y evaporación anual de 825 mm (Estación 15,062, Servicio Meteorológico Nacional). La temperatura media del mes más cálido (abril-mayo) es de 5°C. La precipitación está concentrada entre mayo a septiembre; durante los meses más fríos (diciembre a febrero) hay precipitación en forma de nieve y en marzo, cuando la temperatura asciende, se da el derretimiento de la nieve (Fig. 2). La vegetación dominante dentro del cráter es el pastizal alpino con pastos como *Festuca tolucensis*, *F. hepraestophila* y *Calamagrostis tolucensis*⁶. En las faldas del volcán existen manchones de bosque de pino-encino, de pino, de oyamel y bosque tropical caducifolio.

Las aguas de ambos lagos son frías (<10°C), llegando en ocasiones a formarse una delgada capa de hielo en su superficie durante el invierno. Ambos lagos son permanentes y relativamente someros (< 15 m), con un régimen de mezcla polimíctico cálido y aguas claras, ácidas, poco mineralizadas y de muy baja reserva alcalina⁷⁻⁹.

La biodiversidad de estos lagos ha sido estudiada por diversos autores. Dentro del fitoplancton se han reportado diversas especies de dinoflagelados (*Peridinium spp.*), clorofíceas (*Botryococcus braunii*, *Closterium spp.*), crisofíceas (*Dinobryon spp.*), diatomeas (*Cymbella sp.*, *Melosira sp.*) y cianoprocaritas (*Oscillatoria*)¹⁰⁻¹². La comunidad bentónica incluye a las

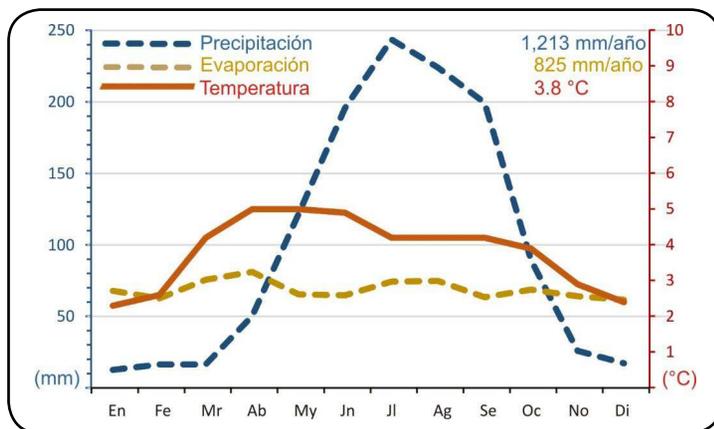


Figura 2. Precipitación, evaporación y temperatura medias mensuales y anuales para la zona de estudio (Estación 15,062, Servicio Meteorológico Nacional, <http://smn.cna.gob.mx/>).

macrofitas *Elatine brachysperma*, *Eleocharis sp.*; y al alga *Nitella gracilis* var. *intermedia*.

La biomasa fitoplanctónica en La Luna es significativamente menor que en El Sol⁹ y esta tendencia también se registra en el zooplancton⁸, esta situación de mayor biomasa en El Sol comparado con La Luna ha sido asociada con los valores más bajos de pH en La Luna^{8,9}.

En cuanto al zooplancton, se han reportado más de 35 especies de rotíferos, 7 cladóceros y 2 copépodos^{8,13-15} de las cuales dos especies de cladóceros son posiblemente endémicas de estos lagos: *Ilyocryptus nevadensis* y *Alona manueli*. En el bentos se han reportado cuatro oligoquetos (*Limnodrilus hoffmeisteri*, *Tubifex tubifex*, *Lumbriculus variegatus* y *Nais pardalis*), un bivalvo (*Pisidium casertanum*), un hidrozooario (*Hydra vulgaris*) y dos quironómidos (*Pagastia sp.* y *Tanytarsus sp.*)¹⁶. El único vertebrado acuático presente en El Sol es la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) que fue introducida artificialmente en estos lagos; en la Luna actualmente no hay peces.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el estudio de las características limnológicas de La Luna y El Sol se realizaron mediciones en campo de pH, temperatura y conductividad eléctrica con una sonda multiparamétrica (Hydrolab Quanta) en mayo, agosto y noviembre del año 2010. Para el estudio de las asociaciones modernas de diatomeas en los dos lagos se recuperaron sedimentos superficiales (2 cm superiores) de cada uno de ellos mediante el uso de una draga en 1991 (marzo) y en los tres muestreos realizados en el año 2010^{17,18}.

Para el estudio paleoambiental en el año 2003 se colectó un núcleo corto de sedimentos (57 cm) de la parte central del lago La Luna usando un nucleador de gravedad. El núcleo fue extraído en un tubo de PVC y transportado al laboratorio donde fue cortado en mitades longitudinales, fotografiado, descrito (color, textura, etc.) y muestreado. Las muestras para fechamiento por ²¹⁰Pb, análisis de bioindicadores (diatomeas y cladóceros) fueron tomados cada 1 cm. Las mediciones de susceptibilidad magnética fueron realizadas cada 2 cm usando un sensor anular magnético Bartington MS2C con un diámetro interno de 10 cm. La muestra de la parte más baja del núcleo (56 cm) fue enviada a un laboratorio comercial (Beta Analytic) para ser fechada por radiocarbono (¹⁴C). Los detalles metodológicos del fechamiento por ²¹⁰Pb se han publicado previamente¹⁷⁻¹⁹.

La taxonomía de diatomeas se realizó en su mayoría siguiendo a Kramer & Lange Bertalot²⁰. Se identificaron valvas teratológicas (deformes), que fueron contadas por separado. Los remanentes de cladóceros (cabezas, caparazones, postabdomenes, garras postabdominales y efipios) fueron contados, pero las garras y efipios del

grupo *Daphnia longispina* fueron contados separadamente. La identificación de remanentes de cladóceros estuvo basada en Sinev & Zawiza^{14,15,21,22}.

Los datos de diatomeas y cladóceros son presentados como abundancias relativas (%) (Fig. 3). Las gráficas fueron realizadas usando el programa TGView 2.0.²³

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Datos limnológicos

Los datos promedio de los tres muestreos del año 2010 para temperatura, pH y conductividad eléctrica para cada lago son presentados en la Tabla I, donde se pueden contrastar con datos similares del año 2000⁹. Los datos de temperatura muestran que ambos lagos tienen aguas frías (<10°C), aunque los datos del año 2010 son aproximadamente 1 °C superiores a los del año 2000, esto sin embargo puede ser un sesgo por el tipo de muestreo, ya que en el año 2010 no se incluyeron muestreos durante el invierno. El pH de La Luna es consistentemente menor que el de El Sol en ambos años (por 0.8 y 1.0 unidades respectivamente), sin embargo el pH promedio de ambos lagos muestra un incremento de alrededor de 1.5 unidades entre los años 2000 y 2010, aunque esto también puede ser un sesgo del muestreo, los valores registrados en el 2010, sobretodo en mayo y agosto, estuvieron por arriba de los rangos reportados en el año 2000. La conductividad eléctrica de ambos lagos fue baja (<100 µS/cm), como es característico en lagos poco

mineralizados, siendo menor en La Luna con respecto a El Sol. Esta diferencia es muy pequeña en 2000 (2 unidades) y se incrementa en 40 unidades en el año 2010, lo que sugiere que es este lago el que está experimentando un cambio más intenso en sus características limnológicas.

Debido a las diferencias en los muestreos entre los años 2000 y 2010 y a la baja mineralización de estos lagos, es difícil evaluar si los cambios detectados, sobretodo en pH y conductividad eléctrica, son significativos, pero sin duda sugieren que los lagos del Nevado de Toluca pueden estar reaccionando a las presiones ambientales a las que están expuestos y resaltan la importancia de continuar monitoreando estos lagos y mantener o incrementar las medidas que protegen a estos delicados ecosistemas. Un aumento en el pH de estos lagos es consistente con un escenario de calentamiento global, ya que se ha observado que en este tipo de lagos de montaña, la temperatura es un control importante del pH, observándose valores más altos asociados con la tendencia moderna al calentamiento^{24,25}.

Diatomeas en sedimentos superficiales de La Luna y El Sol

En la Tabla II se presentan los datos de las especies más abundantes (>10%), la concentración total y la riqueza de especies en los sedimentos superficiales de los lagos La Luna y El Sol en los tres años de estudio (1991, 2003 y 2010), que en total abarcan un rango de 19 años. La riqueza de especies

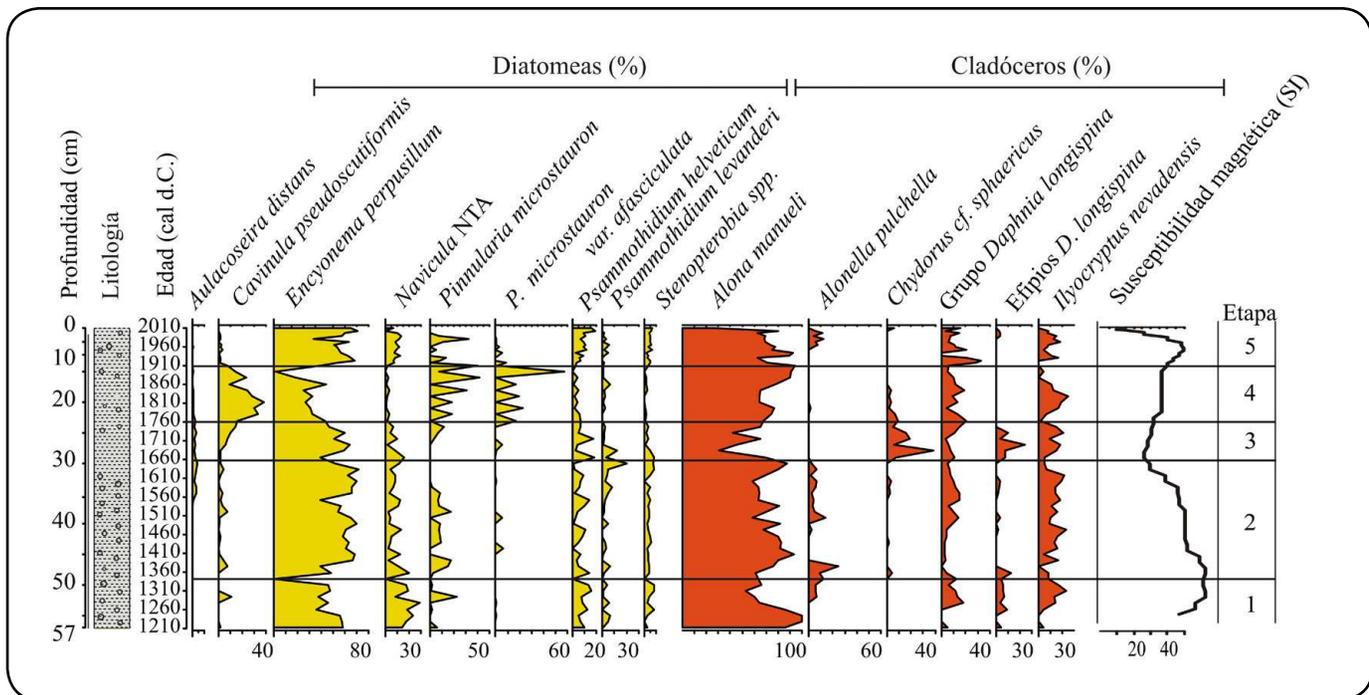


Figura 3. Litología, cronología, diatomeas, cladóceros y susceptibilidad magnética de la secuencia estratigráfica de La Luna, Nevado de Toluca, México.

	La Luna	El Sol	Fuente
<i>Parámetros físico-químicos</i>			
Área (ha)	3.1	23.7	1
Profundidad máxima (m)	10	15	1
Profundidad media (m)	5.0	6.0	1
Temperatura media (°C)	8.5±1.7	8.5±1.9	1
Temperatura media (°C)	9.4±1.9	9.7±1.3	3
pH medio	4.7±0.3	5.5±0.4	1
pH medio	6.2±0.5	7.2±0.7	3
Cond. Eléctrica (µS/cm)	14±1	16±1	1
Cond. Eléctrica (µS/cm)	9.5±0.5	59±1.8	3
Alcalinidad total (mg/l CaCO ₃)	5	5	2
<i>Parámetros tróficos</i>			
Transparencia (m)	7.7±1.5	4.6±1.1	1
Clorofila (µg/l)	0.33±0.26	0.58±0.32	1
DIN (µmol/l)	25.63±2.75	7.61±4.06	1
P-PO ₄ (µmol/l)	0.13±0.13	0.15±0.11	1
Si-SiO ₄ (µmol/l)	0.62±1.08	2.5±2.22	1

Tabla I. Parámetros físico-químicos y tróficos en los lagos La Luna y El Sol, Nevado de Toluca, México. Fuentes: 1. Alcocer *et al.*, 2004⁹ y Dimas-Flores *et al.* 2008⁸ (valores promedio de 13 muestreos mensuales en los años 2000-2001); 2. Armienta *et al.* 2008⁷ (muestreo único en mayo del 2003), y 3. Datos de este estudio (valores promedio de tres muestreos en el año 2010).

fué siempre menor (aproximadamente la mitad) en La Luna con respecto a El Sol, lo mismo ocurrió con la concentración de diatomeas. Esta última variable muestra, sin embargo, un incremento notorio en El Sol durante los muestreos del año 2003 y sobre todo en el 2010 con respecto al valor registrado en el año 1991. La menor riqueza de especies y concentración de diatomeas en La Luna es consistente con los reportes de otros grupos biológicos que han encontrado tendencias similares entre ambos lagos⁹, el aumento en la productividad de diatomeas en El Sol después del año 2003 sugiere un aumento en la productividad de este lago y parece correlacionarse con el incremento en conductividad eléctrica discutido con anterioridad.

En cuanto a la composición de especies, a pesar de la cercanía entre ambos lagos el conjunto de especies de diatomeas dominante en cada lago es diferente; en La Luna las especies más abundantes (>10%) fueron *Encyonema perpusillum* (Cleve-Euler) Mann, *Psammothidium helveticum* (Hust.) Bukhtiyarova & Round, y una especie posiblemente endémica identificada

como *Navicula* NTA (Caballero, 1995), la cual muestra una reducción en su abundancia en los años 2003 y 2010 comparado con el año 1991. Estas especies están adaptadas a vivir en los ambientes más diluidos, ácidos y oligotróficos que dominan actualmente en La Luna comparada con El Sol (Tabla I). El menor pH de la Luna, parece ser un factor limitante para algunas especies¹⁷, lo que contribuye a su menor riqueza específica. La reducción en la abundancia de una de estas especies acidófilas, *Navicula* NTA, en los muestreos de los años 2003 y 2010 es sin embargo, un signo que debe de tomarse en cuenta, ya que correlaciona con la tendencia hacia un aumento en el pH de este lago.

En El Sol las especies más abundantes fueron *Cavinula pseudoscutiformis* (Hust.) Mann y Stickle, *Psammothidium levanderi* (Hustedt) Bukhtiyarova & Round, *Aulacoseira distans* (Ehrenberg) Simonsen, *Encyonema gracile* Kichner, otra especie posiblemente endémica identificada como *Navicula* NTB (Caballero, 1995) y *Pseudostaurosira brevistriata* (Grunow)

	Luna-1991	Luna-2003	Luna-2010	Sol-1991	Sol-2003	Sol-2010
<i>Encyonema perpusillum</i>	37	70	65	5	5	0
<i>Psammothidium helveticum</i>	18	19	16	2	1	0
<i>Navicula</i> NTA	33	1	7	1	0	1
<i>Cavinula pseudoscutiformis</i>	0	0	0	28	23	7
<i>Psammothidium levanderi</i>	5	0	0	23	19	38
<i>Aulacoseira distans</i>	0	0	1	12	12	13
<i>Encyonema gracile</i>	0	0	0	10	4	12
<i>Navicula</i> NTB	0	0	0	4	10	8
<i>Pseudostaurosira brevistriata</i>	0	0	0	0	12	4
Concentración (x10 ⁶ v/gss)	146	401	226	362	563	2360
Riqueza de especies	7	6	8	13	15	19

Tabla II. Abundancias relativas (%) de las especies de diatomeas más abundantes (>10%) en los sedimentos superficiales de los lagos La Luna y El Sol, Nevado de Toluca, México.

Williams & Round. Este conjunto de especies, prácticamente ausentes en La Luna, se consideran como características de las condiciones de menor dilución y mayor pH y nivel de nutrientes en El Sol comparado con La Luna (Tabla I). En El Sol es notorio, sin embargo, una disminución en la abundancia de *C. pseudoscutiformis* en el año 2010 y un incremento en abundancia de *P. brevistriata* en el 2003, una especie que no se registró en el año 1991. Estos cambios, si se consideran en conjunto de las evidencias hacia una mayor productividad de diatomeas en este lago, la disminución de una de las especies acidófilas en La Luna, y los indicios hacia un aumento en el pH del agua de estos lagos, representan focos rojos que nos alertan, ya que pueden representar como se mencionó las primeras reacciones en ellos a las presiones ambientales modernas.

Interpretación paleoambiental de la secuencia sedimentaria de La Luna

La secuencia de sedimentos del lago La Luna fue homogénea en color (café grisáceo) y textura (limo-arcillosa), con presencia de fragmentos líticos superiores a 2 mm de diámetro salvo en los intervalos entre 31-26 cm y 22-17 cm. El fechamiento por ²¹⁰Pb permite estimar una tasa de acumulación media para los primeros 14 cm de la secuencia de 0.14 ± 0.02 cm/año, y una edad de 97 ± 7 años para esa profundidad¹⁸. La edad convencional de radiocarbono para la base de la secuencia (56 cm) fueron 800 ± 40 años AP (Beta-195349), que después de la calibración²⁶ corresponde con el año 1230 +20/-40 dC, indicando que el registro cubre la totalidad de la anomalía climática fría conocida como la Pequeña Edad de Hielo (PEH,

1350 a 1850 dC). Con base en los datos de ²¹⁰Pb y ¹⁴C, se estima una tasa de acumulación media de 0.06 cm/año para la sección entre 14 y 56 cm. Usando estas tasas de acumulación se genera un modelo de edad para la secuencia que permite estimar que el intervalo de muestreo de 1 cm tiene en promedio una resolución temporal de 7 años en la parte superior (0 a 14 cm) y de 16 años en el resto de la secuencia.

La susceptibilidad magnética (SM) presentó valores dentro del rango 12.8 a 45.8 SI, con los valores más bajos (<16 SI) entre 32 y 28 cm y los valores más altos (>40 SI) entre 54 y 47 cm (Fig. 3). En esta cuenca, caracterizada por un bajo desarrollo de suelos y escasa vegetación, la SM puede ser directamente correlacionada con la precipitación, ya que es un valor que depende de la concentración de minerales magnéticos en el sedimento que han sido transportados al lago desde la cuenca de drenaje por la escorrentía superficial.

El análisis de diatomeas arrojó un total de 54 especies identificadas, repartidas en 24 géneros. Las más abundantes (>10%) fueron: *Encyonema perpusillum*, *Psammothidium helveticum*, *Navicula* NTA, *Cavinula pseudoscutiformis*, *Pinnularia microstauron* (Ehrenb.) Cleve, y *Aulacoseira distans*. Los resultados del estudio de sedimentos superficiales indican que las tres primeras especies son características de la flora de diatomeas en La Luna, e indican condiciones de pH más bajo (<6), mientras que *C. pseudoscutiformis* y *A. distans* son especies características de El Sol, indicando condiciones de un pH más elevado (>6). También se registró la presencia

de valvas teratológicas de *E. perpusillum* que son consideradas indicadoras de estrés ambiental posiblemente relacionado con altos niveles de radiación ultra-violeta (UV)²⁷.

En el análisis de cladóceros se identificaron cinco especies distribuidas en tres familias (Chydoridae, Ilyocryptidae, Daphniidae) (Fig. 3): *Alona manueli* Sinev & Zawisza, *Alonella pulchella* Herrick, *Chydorus* cf. *sphaericus* Müller, *Ilyocryptus nevadensis* Cervantes-Martínez, Gutiérrez-Aguirre y Elías-Gutiérrez y el grupo *Daphnia longispina* Müller. Las especies litorales endémicas, *A. manueli* e *I. nevadensis*, junto con la planctónica *D. longispina*, son los taxones dominantes en el lago La Luna moderno, por lo tanto tolerantes a concentraciones bajas de nutrientes y valores bajos de pH (<6) que prevalecen en este lago en la actualidad¹⁹. *Chydorus* cf. *sphaericus* también está presente en el lago moderno La Luna, pero en números muy bajos; esta especie es tolerante a condiciones climáticas desfavorables, especialmente aguas frías y un estado trófico bajo^{28,29}. También se registró la presencia de efipios del grupo *Daphnia longispina*, estas estructuras de resistencia se consideran indicadores de condiciones climáticas desfavorables, como son inviernos más largos y fríos²².

Historia ambiental del lago La Luna

La distribución vertical a lo largo de la secuencia sedimentaria de los valores de SM, abundancia de diatomeas y cladóceros permiten reconstruir la historia ambiental de este lago en 5 etapas (Fig. 3):

Etapa 1, años 1230 a 1360 dC (57 a 48 cm): Los valores de SM son altos y los ensamblajes de diatomeas y de cladóceros son muy similares a los que caracterizan actualmente a La Luna, dentro de las diatomeas *Encyonema perpusillum*, *Navicula* NTA y *Psammothidium helveticum* y dentro de los cladóceros *Alona manueli* e *Ilyocryptus nevadensis*. Lo anterior indica que durante esta etapa el lago La Luna era un lago muy similar al actual, lo que demuestra que es naturalmente ácido, con baja mineralización y bajo nivel de nutrientes.

Etapa 2, años 1360 a 1660 dC (48 a 29 cm): Los valores de SM presentan una disminución gradual lo que sugiere una disminución del nivel lacustre durante esta etapa. A partir del año 1510 se registra un aumento en las diatomeas de *Aulacoseira distans* y en los cladóceros de *Chydorus* cf. *sphaericus*, ambas especies se consideran indicadoras de condiciones climáticas más frías. En conjunto esta zona sugiere que a partir del año 1360 se inicia una tendencia hacia climas más secos y fríos que coinciden con el inicio de la anomalía climática fría conocida como la Pequeña Edad de Hielo.

Etapa 3, años 1660 a 1760 dC (29 a 24 cm): Se presenta un cambio importante en el conjunto de cladóceros, ya que se registran los valores máximos en la abundancia de *Chydorus* cf. *sphaericus* y de efipios, sugiriendo la existencia de condiciones

muy frías en este intervalo¹⁹. Por otra parte la SM presenta sus valores más bajos, indicando el nivel lacustre más bajo del registro. Estas condiciones de clima frío y relativamente seco corresponden con el mínimo de Maunder (años 1645 a 1715), que es una etapa de baja actividad solar que ha sido asociada con los climas fríos de la PEH. Bajo este escenario durante esta etapa es posible que La Luna pudiera haber presentado una cobertura de hielo estacional, similar a la delgada cobertura de hielo que fue observada durante marzo del año 2010, cuando se presentó un invierno particularmente frío.

Etapa 4, años 1760 a 1910 dC (24 a 14 cm): La abundancia de *Aulacoseira distans*, *Chydorus* cf. *sphaericus* y de efipios se reduce en esta etapa, sugiriendo que las condiciones climáticas ya no son tan frías comparadas con la etapa anterior. La SM inicia una tendencia hacia valores más altos, sugiriendo que los climas tampoco son tan secos como en la etapa anterior, aunque todavía más secos y fríos que en la actualidad. En esta zona el conjunto de diatomeas muestra un cambio importante, *Cavinula pseudoscutiformis* y *Pinnularia microstauron* alcanzan sus abundancias máximas, indicando un incremento en el pH del lago. Es posible que la tendencia hacia climas menos fríos esté asociada con este cambio de pH, pues en este tipo de lagos de montaña, la temperatura es un control importante del pH^{24,25}. En diversos lagos alpinos la tendencia moderna al calentamiento se ha relacionado con tendencias hacia valores más altos de pH y es probable que ésta sea una situación similar a la que experimentó La Luna hacia el final de la PEH y posiblemente pueda estar experimentando en la actualidad.

Etapa 5, años 1910 a 2010 (14 a 0 cm): En esta etapa tanto el conjunto de diatomeas como el de cladóceros vuelven a estar compuestos por las especies que caracterizan actualmente a La Luna, indicando el establecimiento de las condiciones modernas del lago. Por otro lado la SM regresa a valores altos, lo que indica el final de los climas secos y fríos de la PEH. Hacia la cima del núcleo (años 1940 ó 1950) se registra una desaparición temporal del cladóceros *Daphnia longispina*, que pudiera ser explicada por un intento fallido de introducir la trucha arcoíris en este lago a mediados del siglo XX, cuando las políticas gubernamentales promovieron la introducción de peces en varios cuerpos de agua considerados infértiles en el centro de México, incluido el lago de El Sol.

Contexto Paleoclimático

La PEH (1350-1850 dC.) representa una de las oscilaciones climáticas mejor documentadas para la región del Atlántico del Norte³⁰ y el enfriamiento ocurrido durante esta etapa ha sido relacionado con los mínimos de actividad solar conocidos como mínimo de Spörer (años 1450 a 1540) y mínimo de Maunder (años 1645 a 1715)^{31,32}. En México, la PEH se ha asociado con decrementos en la temperatura de 1.5 - 2°C^{32,33} y con avances de los glaciares de montaña en el rango de 250 m, si bien estos todavía no han sido fechados con precisión, los datos de

La Luna sugieren que esto pudo ocurrir entre los años 1660 y 1760, cuando se registran los climas más fríos.

Registros históricos de México documentan a la PEH como una serie de eventos recurrentes de sequías entre los siglos XIV y XIX³⁴⁻³⁷, sin embargo, en nuestro país hay pocos registros paleoclimáticos (históricos o geológicos) que cubran con buena resolución temporal el periodo completo de la PEH y que permitan tener una perspectiva clara del efecto que tuvo esta anomalía climática en el centro de México, el registro de La Luna aporta datos valiosos dentro de este contexto. A continuación se compararán los datos del registro de La Luna con los cinco registros geológicos paleoclimáticos en México (Fig 1a) que abarcan la totalidad de la PEH con el objetivo de generar una visión regional sobre las características ambientales en el centro de México durante esta etapa. Los registros que se discutirán incluyen a el lago Santa María del Oro, Nayarit³⁸; el lago Juanacatlán, Jalisco³⁹; el registro dendrocronológico de la barranca de Amealco, Querétaro⁴⁰; el estudio de una estalagmita en la cueva de Juxtlahuaca, Guerrero⁴¹; el Lago Verde, Los Tuxtlas, Veracruz³² y la Aguada X'Caamal, en Yucatán⁴².

En La Luna se identifica el comienzo de la PEH hacia el año 1360, como un periodo de condiciones más secas que se extiende hasta el año 1910. En la mayoría de los registros paleoclimáticos previamente mencionados el inicio de la PEH es también registrado como un evento de condiciones más secas entre los años 1365 y 1400, en la cueva de Juxtlahuaca³⁴, esta tendencia se presenta retrasada y su inicio se registra hacia el año 1500. Sólo en el Lago Verde²⁹, el sitio con el balance hidrológico más alto (más húmedo) y por lo tanto menos propenso a registrar una sequía, la PEH es registrada como una fase de mayor profundidad del lago, con las fases más profundas asociadas a los mínimos solares de Spörer y Maunder. En Aguada X'Caamal³⁵ las condiciones de sequía se extienden a lo largo de toda la PEH, en un patrón muy similar al de La Luna. En los demás sitios el evento de sequía al inicio de la PEH es de corta duración pero se presentan otros eventos de sequía, en particular la mayoría de los registros coincide en un evento de sequía entre 1650 y 1780, coincidiendo con el momento en el que en La Luna se registran las condiciones más frías (1660 a 1760). Este intervalo corresponde con el mínimo de Maunder, durante el cual se estima que ocurrieron las temperaturas más frías del hemisferio norte durante el último milenio^{43,44}.

Las condiciones climáticas secas en México durante la PEH han sido explicadas por una posición más austral de la zona de convergencia intertropical (ZCIT)⁴² y por la prevalencia de condiciones tipo El Niño^{30,41}. Ambos mecanismos climáticos reducen la precipitación de verano sobre la mayor parte de México. El registro de Lago Verde sugiere, sin embargo que los frentes polares (nortes), que traen precipitación de invierno, fueron más frecuentes durante la PEH generando una distribución de la precipitación más homogénea a lo largo del

año^{32,45}. Este factor, aunado a la baja evaporación debido a su elevada altitud, fue importante para La Luna, y permitió que este lago relativamente somero (10 m) permaneciera como un cuerpo de agua permanente aún durante el episodio más seco de la PEH.

Las lluvias de invierno asociadas con los nortes pudieron haber sido un control importante de las condiciones de sequía hacia el final de la PEH, cuando condiciones menos frías pero relativamente secas persistieron en La Luna. Es posible que durante esta etapa los inviernos menos fríos también fueran menos húmedos y estuvieran asociados a condiciones de sequía más intensas en primavera. Los registros históricos mencionan diversas sequías entre 1760 y 1910, hacia el final de la PEH y correlacionan con reportes de baja precipitación en invierno y temporadas de lluvias cortas; éstas son las condiciones que precedieron a las guerras de Independencia (1810-1821) y de la Revolución (1910-1924)^{34,35,46,47}.

CONCLUSIONES

Este trabajo confirma que ambos lagos tienen aguas ácidas (pH medio < 7), frías (<10°C) y con baja mineralización (CE <100 µS/cm), siendo La Luna un lago más diluido y más ácido que El Sol. Estas características ambientales diferenciales entre ambos lagos se reflejan en una flora de diatomeas característica de cada uno de ellos. En particular las condiciones de mayor acidez de La Luna están asociadas con una menor riqueza de especies, menor productividad y un conjunto característico de diatomeas que se pueden definir como acidófilas, dominado por las especies *Encyonema perpusillum*, *Psammothidium helveticum* y *Navicula* NTA. Por su parte El Sol tiene un conjunto de diatomeas dominado por *Cavinula pseudoscutiformis*, *Psammothidium levanderi*, *Aulacoseira distans*, *Encyonema gracile* y *Navicula* NTB. Estas especies (acidobiontes) parecen estar restringidas por los pH más bajos (<6) de La Luna, ya que están prácticamente ausentes en este lago.

Comparando los datos de las variables hidroquímicas medidas (temperatura, pH y conductividad eléctrica), con 10 años de separación (2000 vs. 2010) se observa una relativa estabilidad en estos lagos, pues sus características no presentan cambios drásticos. Se detectan, sin embargo, algunas tendencias que requerirán confirmación por trabajos posteriores, pero que son consistentes con los datos de diatomeas en sedimentos, hacia valores de pH más altos en ambos lagos y en El Sol, hacia valores más altos de conductividad eléctrica. Estas tendencias son consistentes con los cambios detectados en los conjuntos de diatomeas en sedimentos superficiales, donde se observa que en el intervalo de 19 años (1991, 2003 y 2010), ha habido una disminución en la abundancia de una de las especies acidófilas características de La Luna y posiblemente endémica de este lago (*Navicula* NTA). En El Sol se registra un aumento notable en la concentración de diatomeas en el sedimento y una disminución en una de sus

especies características (*C. pseudoscutiformis*), mientras que una especie de reproducción rápida, como *Pseudostaurosira brevistriata* se integra al conjunto de diatomeas.

Un aumento en el pH de estos lagos es consistente con un escenario de calentamiento global, ya que son las tendencias que se han observado en este tipo de lagos de montaña en otras regiones del mundo. De esta manera este trabajo demuestra que el lago La Luna es un lago naturalmente ácido, ya que ésta ha sido su condición dominante a lo largo de los últimos 800 años. Por otro lado es factible que los estresores modernos asociados al cambio global favorezcan un incremento en su pH, una situación que ya ocurrió anteriormente en este lago, al final de la PEH.

El registro sedimentario de La Luna es un registro de alta resolución (decadal) que permite identificar el efecto ambiental que tuvo la PEH en este lago y, mediante comparaciones con otros registros, en el centro de México. En esta región se identifica a la PEH como una etapa de climas secos y fríos iniciando entre los años 1350 y 1510 y extendiéndose hasta el año 1910. El registro de La Luna identifica a la etapa más fría y seca entre los años 1660 y 1760, asociada con el mínimo de Maunder. La etapa final de la PEH, entre los años 1760 y 1910, representa un momento especial en la historia de este lago, ya que es el único momento en que su pH fue menos ácido y los conjuntos de diatomeas fueron diferentes de los actuales.

El presente trabajo destaca el valor de los lagos del Nevado de Toluca como centinelas del cambio ambiental tanto pasado como presente y futuro, y la importancia de continuar protegiendo y estudiando estos ecosistemas tan sensibles, que se encuentran amenazados por las presiones ambientales asociadas al cambio global.

AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna (CEPANAF), Secretaría de Ecología, Gobierno del Estado de México, por el permiso para realizar los muestreos en el Nevado de Toluca y a Luis Miguel Mandujano Álvarez, director del Parque Nacional Nevado de Toluca. A Alejandro Rodríguez por su apoyo en la recuperación de la secuencia sedimentaria. Este trabajo es parte de la tesis doctoral de Estela Cuna, quien agradece el apoyo brindado por el Posgrado de Ciencias Biológicas, UNAM y la beca doctoral otorgada por el CONACyT. Al proyecto PINC-UNAM "Los lagos del Nevado de Toluca, México: centinelas para la detección y análisis del cambio global".

REFERENCIAS

- Koinig, K. A. et al. Environmental changes in an alpine lake (Gossenköllesee, Austria) over the last two centuries -the influence of air temperature on biological parameters. *Journal of Paleolimnology* **28**, 147-160 (2002).
- Battarbee, R. W. et al. Comparing palaeolimnological and instrumental evidence of climate change for remote mountain lakes over the last 200 years. *Journal of Paleolimnology* **28**, 161-179 (2002).
- Battarbee, R. W., Thompson, R., Catalan, J., Grytnes, J.-A. & Birks, H. Climate variability and ecosystem dynamics of remote alpine and arctic lakes: the MOLAR project. *Journal of Paleolimnology* **28**, 1-6 (2002).
- Macías, J. et al. Late Pleistocene-Holocene cataclysmic eruptions at Nevado de Toluca and Jocotitlan volcanoes, central Mexico. *Brigham Young University Geology Studies* **42**, 493-528 (1997).
- García, A. *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köpen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*. 246 (Universidad Nacional Autónoma de México, 1973).
- Sandoval, B. A. J. *Actualización y análisis cartográfico sobre el uso del suelo y vegetación del parque nacional Nevado de Toluca, Edo. de México*. Tesis de Licenciatura (Biología) Universidad Nacional Autónoma de México, 107 págs. (1987).
- Armienta, M. A. et al. Water chemistry of lakes related to active and inactive Mexican volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **178**, 249-258, doi:DOI 10.1016/j.jvolgeores.2008.06.019 (2008).
- Dimas Flores, N., Alcocer, J. & Ciro Pérez, J. The structure of the zooplankton assemblages from two neighboring tropical high mountain lakes. *Journal of Freshwater Ecology* **23**, 21-31 (2007).
- Alcocer, J., Oseguera, L. A., Escobar, E., Peralta, L. & Lugo, A. Phytoplankton biomass and water chemistry in two high mountains, tropical lakes in central Mexico. *Arctic, Antarctic and Alpine Research* **36**, 342-346 (2004).
- Löffler, H. Contribution to the limnology of High-Mountain lakes in Central America. *Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie* **57**, 397-408 (1972).
- Banderas-Tarabay, A. G. Phycoflora of the tropical high-mountain lake El Sol, Central Mexico, and some biogeographical relationships. *Hydrobiologia* **354**, 17-40 (1997).
- González, V. R. *Contribución al conocimiento de la producción primaria de un cuerpo de agua de alta montaña y su relación con el medio a través de la aplicación de modelos multivariados*. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, 94 págs. (2002).
- Sarma, S. S., Elías-Gutiérrez, M. & Serranía Soto, C. Rotifers from high altitude crater-lakes at Nevado de Toluca Volcano, México. *Hidrobiológica* **6**, 33-38 (1996).
- Sinev, A. Y. & Zawisza, E. Comments on cladocerans of crater lakes of the Nevado de Toluca Volcano (Central Mexico), with the description of a new species, *Alona manueli* sp. n. *Zootaxa* (in press) (2013).
- Cervantes-Martínez, A., Gutiérrez-Aguirre, M. & Elías-Gutiérrez, M. Description of *Ilicryptus nevadensis* (Branchiopoda, Anomopoda), a new species from high altitude crater lake in the volcano Nevado de Toluca, Mexico. *Crustaceana* **354**, 311-321 (2000).
- Oseguera, P. L. *Ecología de las comunidades bentónicas de los lagos tropicales de alta montaña*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 105 págs. (2004).
- Caballero, M. E. The diatom flora of two acid lakes in central Mexico. *Diatom. Res.* **11**, 227-240 (1996).

18. Cuna, E. *et al.* Environmental impacts of Little ice Age cooling in central Mexico recorded in the sediments of a tropical alpine lake. *J. Paleolimnol.* **51**, 1-14, doi:10.1007/s10933-013-9748-0 (2014).
19. Zawisza, E., Caballero, M. & Ruiz-Fernández, C. 500 years of ecological changes recorded in subfossil cladocera in a high-altitude tropical lake la Luna, central Mexico. *Stud. Quat.* **29**, 23-29 (2012).
20. Krammer, K. & Lange-Bertalot, H. *Süßwasserflora von Mitteleuropa (Teil 1-4)*. (Stuttgart-Jena: VEB Gustav Fischer Verlag, 1986-1991).
21. Elias-Gutiérrez, M. *et al.* Cladocera y copepoda de las aguas continentales de México: Guía ilustrada. (UNAM, ECOSUR, SEMARNAT CONACYT, CONABIO, 2008).
22. Frey, D. G. in *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology* (ed B. E. Berglund) 667-692 (John Wiley & Sons, 1986).
23. Tilia and TGView 2.0.2 (Illinois State Museum. Research and Collection Center, Springfield, Illinois, 2004).
24. Koinig, K. A., Schmidt, R., Sommaruga-Wögrth, S., Tessadri, R. & Psenner, R. Climate change as the primary cause for pH shifts in a high alpine lake. *Water, Air, and Soil Pollution.* **104**, 167-180 (1998).
25. Sommaruga-Wögrath, S. *et al.* Temperature effects on the acidity of remote alpine lakes. *Nature* **387**, 64-67, doi:10.1038/387064a0 (1997).
26. Radiocarbon Calibration Program CALIB Rev 5.0.1 (2005).
27. Falasco, E., Bona, F., Badino, G., Hoffmann, L. & Ector, L. Diatom teratological forms and environmental alterations a review. *Hidrobiol.* **623**, 1-35 (2009).
28. Bennike, O., Sarmaja-Korjonen, K. & Seppanen, A. Reinvestigation of the classic late-glacial Bølling Sø sequence, Denmark: chronology, macrofossils, Cladocera and chydorid ephippia. *J. Quatern. Sci.* **19**, 465-478 (2004).
29. Sarmaja-Korjonen, K. Chydorid ephippia as indicators of past environmental changes – a new method. *Hydrobiol.* **526**, 129-136 (2004).
30. Mann, M. E. *et al.* Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. *Science* **326**, 1256-1260, doi:10.1126/science.1177303 (2009).
31. Bond, G. *et al.* Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science* **294**, 2130-2136, doi:10.1126/science.1065680 (2001).
32. Lozano-García, M. S., Caballero, M., Ortega, B., Rodríguez, A. & Sosa, S. Tracing the effects of the Little Ice Age in the tropical lowlands of Eastern Mesoamerica. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **104**, 16200-16203 (2007).
33. Vázquez-Selem, L. in Escenarios de cambio climático: Registros del Cuaternario en América Latina I Vol. I (eds. M. Caballero & B. Ortega) Ch. XI, 215-238 (Universidad Nacional Autónoma de México, 2011).
34. Contreras-Servín, C. Las sequías en México durante el siglo XIX. *Investigaciones geográficas* **56**, 118-133 (2005).
35. Florescano, E. *Análisis histórico de las sequías en México*. (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1980).
36. Metcalfe, S. & Davies, S. Deciphering recent climate change in central Mexican lake records. *Climatic Change* **83**, 169-186, doi:DOI 10.1007/s10584-006-9152-0 (2007).
37. Therrel, M. D., Stable, W. D. & Acuña-Soto, R. Aztec drought and the "curse of one rabbit". *Bulletin of the American Meteorological Society* **85**, 1263-1272 (2004).
38. Sosa-Nájera, S., Lozano-García, S., Roy, P. D. & Caballero, M. Registro de sequías históricas en el occidente de México con base en el análisis elemental de sedimentos lacustres: El caso del lago de Santa María del Oro. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* **62**, 437-451 (2010).
39. Metcalfe, S. E., Jones, M. D., Davies, S. J., Noren, A. & MacKenzie, A. Climate variability over the last two millennia in the North American Monsoon region, recorded in laminated lake sediments from Laguna de Juanacatlán, Mexico. *The Holocene* **28**, 1195-1206, doi:10.1177/0959683610371994 (2010).
40. Stahle, D. W. *et al.* Major Mesoamerican droughts of the past millennium. *Geophysical Research Letters* **38** (2011).
41. Lachniet, M. S., Bernal, J. P., Asmerom, Y., Polyak, V. & Piperno, D. A 2400 yr Mesoamerican rainfall reconstruction links climate and cultural change. *Geology* **40**, 259-262 (2012).
42. Hodell, D. A. *et al.* Climate change on the Yucatán Peninsula during the Little Ice Age. *Quaternary Research* **63**, 109-121 (2005).
43. Jones, P. D. & Mann, M. E. Climate over past millenia. *Reviews of Geophysics* **42**, RG2002 (2004).
44. Matthews, J. A. & Briffa, K. R. The "Little Ice Age", reevaluation of an evolving concept. *Geogr. Ann.* **87 A**, 17-36 (2005).
45. Jáuregui, E. Climate changes in Mexico during the historical and instrumental periods. *Quaternary International* **43-44**, 7-17 (1997).
46. Kienel, U. *et al.* First lacustrine varve chronologies from Mexico: impact of droughts, ENSO and human activity since AD 1840 as recorded in maar sediments from Valle de Santiago. *Journal of Paleolimnology* **42**, 587-609, doi:DOI 10.1007/s10933-009-9307-x (2009).
47. Swan, S. L. Mexico in the Little Ice Age. *The journal of Interdisciplinary History* **11**, 633-648 (1981).