



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Reconstrucción paleoambiental basada en el
análisis de ostrácodos fósiles del Lago T'zi BaNá en
la Selva Lacandona, Chiapas, México**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**B I Ó L O G A
P R E S E N T A:**

CISNEROS GARCÍA ANAÍS



**DIRECTOR DE TESIS: Dr. rer. nat. LISETH
CAROLINA PÉREZ ALVARADO**

2017

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

HOJA DE DATOS DEL JURADO

1. Datos del alumno

Cisneros
García
Anaís
(55) 38180495
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Biología
310028510

2. Datos del tutor

Dra.
Pérez
Alvarado
Liseth Carolina

3. Datos Sinodal 1

Dr.
Gío
Argáez
Frank Raúl

4. Datos Sinodal 2

Dr.
Correa
Metrio
Yohan Alexander

5. Datos Sinodal 3

Dra.
Caballero
Miranda
Margarita Erna

6. Datos Sinodal 4

Dr.
Alcocer
Durand
Javier

7. Datos del trabajo escrito

Reconstrucción paleoambiental basada en el análisis de ostrácodos fósiles del Lago T'zi BaNá en la Selva Lacandona, Chiapas, México
63
2017

DEDICATORIA

La presente tesis está enteramente dedicada a mi madre, a mi Polly, quien me impulso a seguir mis sueños y defendió los mismos de cualquiera. Quien me hizo la persona que soy hoy y me enseñó a que, todo lo que hiciera, lo hiciera con el corazón.

Para ella, eternamente, con todo el amor que le tengo.

CONTENIDO

LISTADO DE FIGURAS	V
LISTADO DE TABLAS	VII
RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	3
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1 PALEOLIMNOLOGÍA	5
2.2 INDICADORES BIOLÓGICOS	5
<i>Ostracoda</i>	6
2.3 INDICADORES NO-BIOLÓGICOS	8
<i>Geoquímica del sedimento</i>	8
<i>Susceptibilidad magnética</i>	9
2.4 CLIMA EN EL HOLOCENO	9
<i>Ciclos de Bond</i>	10
3. ANTECEDENTES	11
4. JUSTIFICACIÓN	14
5. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	15
6. OBJETIVOS	15
7. HIPÓTESIS	16
8. ÁREA DE ESTUDIO	17
9. MÉTODO	19
9.1 TRABAJO EN CAMPO	19
9.2 TRABAJO DE LABORATORIO	19
10. RESULTADOS	22
10.1 MODELO DE EDAD	22
10.2 DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA Y SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA	23
10.3 GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS	25
10.4 CLASIFICACIÓN Y ECOLOGÍA DE OSTRACODA	28
10.5 ABUNDANCIAS DE ESPECIES BENTÓNICAS Y NECTOBENTÓNICAS	32
10.6 ABUNDANCIAS TOTALES DE ADULTOS Y JUVENILES	34
10.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS (DCA)	36
11. DISCUSIÓN	42
11.1 OSTRÁCODOS FÓSILES DEL LAGO T'ZI BANÁ	42
11.2 PALEOLIMNOLOGÍA DEL LAGO T'ZI BANÁ	44
11.3 RECONSTRUCCIÓN AMBIENTAL DEL LAGO T'ZI BANÁ CON BASE EN LOS INDICADORES BIOLÓGICOS Y NO BIOLÓGICOS	45
11.4 EL REGISTRO DEL LAGO T'ZI BANÁ EN EL CONTEXTO LOCAL Y REGIONAL	49
12. CONCLUSIONES	52
13. AGRADECIMIENTOS ACADÉMICOS	54
14. AGRADECIMIENTOS PERSONALES	56
15. REFERENCIAS	57

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Estadios (relación peso y tamaño) de la clase Ostracoda (Smol, et al. 2001) _____ 7

Figura 2. Localización del sitio de estudio. En la imagen de la izquierda se observa en el recuadro negro la ubicación geográfica y la elevación a la que se encuentra el Lago T'zi BaNá. Del lado derecho se muestra el punto específico en el que encuentra el Lago T'zi BaNá dentro del Área de Protección de Flora y Fauna Metzabok. _____ 18

Figura 3. Modelo de edad del registro sedimentario. En el eje Y se presenta la profundidad en centímetros (cm) y en el eje de las X se muestran las edades en años calibrados antes del presente (cal AP). El círculo naranja hace referencia a una extrapolación a la superficie debido al sedimento perdido. En los puntos azules se muestran las tres fechas en las que se basó el modelo de edad dadas en la Tabla 1. _____ 23

Figura 4. Perfil litológico del núcleo TZI13-III obtenido del Lago T'zi BaNá, Selva Lacandona, Chiapas. _____ 24

Figura 5. Susceptibilidad magnética (SM) a lo largo del tiempo. En el eje X se presentan las edades calibradas antes del presente (cal AP) y en el eje Y la escala en SI. Se muestran las oscilaciones de los valores de la SM en los momentos de mayor entrada de material magnético (detrítico) en los picos altos y la menor entrada de este material en los picos más bajos. _____ 25

Figura 6. Concentraciones de los elementos traza medidas en la secuencia sedimentaria TZI13-III, a través de la edad del registro sedimentario. En el eje X se muestran las concentraciones en partes por millón (ppm) para el caso del Ti y el Sr, y la cantidad de material magnetizado para el caso de la SM; en el eje Y se muestran los años calibrados antes del presente (cal AP). _____ 27

Figura 7. Lámina fotográfica de ostrácodos del Lago T'zi BaNá, utilizando Microscopía Electrónica de Barrido. (a) Cytheridella ilosvayi valva izquierda (VI), vista externa (VE); (b) Strandesia intrepida VI, VE; (c) Limnocythere sp. valva derecha (VD), VE; (d) Heterocypris punctata VI, VE; (e) Cypridopsis vidua VD, VE; (f) Physocypris sp. VD, vista interna (VIIn); (g) Potamocypris sp. VI, VE; (h) Pseudocandona annae DV, VE. _____ 31

Figura 8. Abundancias absolutas de las especies de ostrácodos presentes en el Lago T'zi BaNá. El eje X se caracteriza por ser las edades cal AP y los ejes Y por

ser las abundancias de cada una de las especies. Estas se muestran por hábitos ecológicos (bentónicas y nectobentónicas), diferenciadas en adultas (líneas negras) y en juveniles (líneas blancas); con cuatro zonas identificadas. Códigos de especies: PSE (*Pseudocandona annae*), CIL (*Cytheridella ilosvayi*), DST (*Darwinula stevensoni*), LIM (*Limnocythere* sp.), PHY (*Physocypria* sp.), HPU (*Heterocypris punctata*), POT (*Potamocypris* sp.), CVI (*Cypridopsis vidua*), SIN (*Strandesia intrepida*)._____ 33

Figura 9. Total de conteos de valvas encontradas. En el eje X se muestran los años calibrados antes del presente (cal AP) y en el eje Y las abundancias de los totales. Se observan el total de valvas adultas tanto intactas como rotas (curvas negras), el total de valvas juveniles rotas e intactas (curvas blancas) y el total de valvas rotas e intactas (curvas grises) donde se contaron sin diferenciar las valvas entre adultas y juveniles. Códigos: AVI (valvas adultas intactas), JVI (valvas juveniles intactas), AVR (valvas adultas rotas), JVR (valvas juveniles rotas), TVI (total de valvas intactas), TVR (total de valvas rotas), TVAD (total de valvas adultas) y TVJUV (total de valvas juveniles). _____ 35

Figura 10. Ordenación de las especies del Lago T'zi BaNá en el plano definido por el eje 1 (temperatura) y el eje 2 (profundidad) del Análisis de Correspondencia sin Tendencia (DCA por sus siglas en inglés). Códigos de especies: PSE (*Pseudocandona annae*), CIL (*Cytheridella ilosvayi*), DST (*Darwinula stevensoni*), LIM (*Limnocythere* sp.), PHY (*Physocypria* sp.), HPU (*Heterocypris punctata*), POT (*Potamocypris* sp.), CVI (*Cypridopsis vidua*), SIN (*Strandesia intrepida*). _____ 37

Figura 11. Representación estratigráfica de los ejes 1 y 2 del Análisis de Correspondencia sin Tendencia (DCA). Las líneas negra y roja muestran los valores en desviaciones estándar (eje Y) del eje 1 y 2 del plano bidimensional de la Figura 10 en años cal AP (calibrados antes del presente) (eje X). _____ 39

Figura 12. Diagrama incluyente: geoquímica y susceptibilidad magnética (SM), ensambles de las valvas adultas de ostrácodos encontradas en el núcleo del Lago T'zi BaNá, y representación estratigráfica de ambos ejes del Análisis de Correspondencia sin Tendencia (DCA). Códigos de especies: CIL (*Cytheridella ilosvayi*); SIN (*Strandesia intrepida*). _____ 41

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. *Datación del núcleo obtenido del Lago T'zi BaNá en el que se muestran las 3 fechas en las que se basó el modelo de edad en conjunto con la profundidad a la que se encuentra.*_____ 22

Tabla 2. *Ecología de las especies identificadas del Lago T'zi BaNá (Modificado de Pérez, et al. (2010a)).*_____ 29

RESUMEN

El Lago T'zi BaNá es un cuerpo de agua kárstico de la Selva Lacandona, Chiapas, México y es de gran importancia por ser el de mayor extensión (173.9 ha) en la zona, y presentar una amplia biodiversidad, que se encuentra con protección legal dentro del Área de Protección de Flora y Fauna, Metzabok. Así mismo, el lago se sitúa en una zona (selva tropical de altitudes medias) en la cual son escasos los estudios paleoambientales basados en bioindicadores acuáticos, que permitan conocer la evolución del lago durante el Holoceno, y siendo aún menor el número de estudios que combinan indicadores biológicos y no biológicos. La mayoría de estudios paleoambientales se han concentrado en altitudes bajas y altas en México por lo que las altitudes medias de Chiapas han permanecido casi sin ser estudiadas. En este estudio se realizó un análisis cuantitativo utilizando múltiples paleoindicadores (*multiproxy*), combinando indicadores biológicos (ostrácodos) y no-biológicos (geoquímica elemental y susceptibilidad magnética), obteniendo así información tanto interna como externa del lago. Con esta información se realizó una reconstrucción paleoambiental de los últimos ~7,000 años cal AP en una secuencia sedimentaria de ~3.67 m de longitud del Lago T'zi BaNá. Se identificaron un total de nueve especies de ostrácodos fósiles (4 bentónicas y 5 nectobentónicas) pertenecientes a las familias Candonidae, Cyprididae, Limnocytheridae y Darwinulidae en la secuencia sedimentaria estudiada. Las especies más abundantes fueron *Cytheridella ilosvayi*, *Darwinula stevensoni*, *Pseudocandona annae*, y *Physocypria* sp. El Análisis de Correspondencia sin Tendencia (DCA) permitió identificar cuatro zonas en la secuencia sedimentaria, principalmente diferenciadas por los cambios en la temperatura y en los niveles del lago: La Zona I (~7,000 – 6,500 años cal AP) se caracteriza por unas temperaturas cálidas y un nivel del lago somero indicado por la alta abundancia de *C. ilosvayi* y altas concentraciones de Sr. La Zona II (~6,500 – 4,200 años cal AP), representa la época con mayores cambios, sin embargo, las condiciones ambientales dominantes fueron temperaturas templadas, dado por la poca abundancia de *C. ilosvayi*, y un lago más profundo, indicado por las altas abundancias de *Physocypria* sp. La Zona III (~4,200 – 3,450 años cal AP) presentó un aumento en la temperatura, asociada a las altas

abundancias de *Cytheridella ilosvayi*, y una profundidad baja, condición sugerida también a partir de las altas abundancias de *Strandesia intrepida* y por las altas concentraciones de Sr. Y finalmente la Zona IV (3,450-2,500 cal AP) se caracterizó por un ambiente cálido, con niveles del lago someros, indicados por la presencia de *C. ilosvayi* y de *S. intrepida*, respectivamente, además de las bajas concentraciones de Ti, y un aumento ligero en el Sr. De igual manera, en cada zona identificada, existió una dominancia de valvas juveniles intactas, sugiriendo poco transporte de las mismas y/o que las condiciones ambientales fueron desfavorables para que algunos organismos llegaran a un estadio adulto. La información generada en este estudio demuestra importantes cambios hidrológicos que se encuentran registrados en los sedimentos del lago T'zi BaNá, lo cual sienta las bases para futuros estudios climáticos de la región del norte de los Neotrópicos incluyendo la comparación de registros a lo largo de un gradiente altitudinal y latitudinal.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es un fenómeno que ha afectado a la Tierra a lo largo del tiempo en todo el mundo. Se define como fluctuaciones en las condiciones ambientales de un lugar determinado, que repercute tanto en la flora como en la fauna del sitio (Caballero, *et al.* 2013). Estos cambios en las condiciones ambientales se ven reflejados en los sistemas acuáticos, los cuales son sensibles a las variaciones climáticas del entorno, siendo considerados "centinelas del cambio" (Williamson, 2009). La Limnología es la ciencia encargada de estudiar los cambios ambientales actuales de los ecosistemas acuáticos, dentro de los que destacan los lagos (Caballero, *et al.* 2013). Estos últimos son ecosistemas pequeños en comparación con los mares u océanos y que además son de suma importancia, ya que son de los más sensibles a los cambios ambientales, especialmente los lagos cerrados (Caballero, *et al.* 2013).

De estas variaciones ambientales y climáticas existen registros que prevalecen en los sedimentos lacustres, y es la Paleolimnología la encargada del estudio de cualquier tipo de información preservada en registro sedimentario, permitiendo así reconstruir la evolución de un lago y/o de su entorno en el pasado (Pienitz, 2009; Caballero *et al.* 2013). En estas reconstrucciones climáticas con frecuencia se utilizan indicadores o *proxies* que pueden ser biológicos o no-biológicos, los cuales proveen información valiosa en lo que a las variaciones climáticas y edad del lago se refiere (Pinilla, 1998).

Entre los indicadores biológicos se encuentran algunas especies de fitobentos y zoobentos, siendo el último el que incluye a los microcrustáceos como los cladóceros y los ostrácodos (Cohen, 2003a). Los ostrácodos son microcrustáceos que pertenecen a la clase Ostracoda. Los ostrácodos de agua dulce se encuentran dentro del orden Podocopida y presentan un cuerpo con 6 a 8 apéndices dentro de un caparazón bivalvo que se componen de calcita y magnesio (Rodríguez, 2011). Estos organismos son de gran importancia paleolimnológica debido a que las valvas que quedan depositadas en el sedimento presentan un alto porcentaje de preservación fósil (Cohen, 2003a). Los ostrácodos son sumamente sensibles a

cambios en factores como la temperatura, el pH, salinidad, etc.; sin embargo, han logrado una gran diversificación y adaptación a diferentes condiciones climáticas, siendo considerados excelentes indicadores (Cohen, 2003a).

Estudios realizados en la Selva Lacandona, la cual se localiza en las montañas del oriente del estado de Chiapas, confirman su potencial paleoclimático (Díaz, *et al.* 2017; Vázquez-Molina, *et al.* 2016; Franco-Gaviria, 2014; Echeverría, 2016). Dentro de esta región, se sitúa el Área de Protección de Flora y Fauna Metzabok, sitio en el que se localiza el Lago T'zi BaNá, con una altura media de 542 m.s.n.m (CONANP, 2006). El presente estudio sobre el Lago T'zi BaNá brindará información que ayudará a conocer su evolución durante el Holoceno, que será generada por el estudio de ostrácodos fósiles e indicadores no-biológicos de una secuencia sedimentaria del mismo lago.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Paleolimnología

Los sedimentos lacustres se componen de partículas que a lo largo del tiempo se depositan en el fondo de los lagos, siendo una muestra real de las interacciones entre los factores bióticos y abióticos que repercuten tanto en el lago como en la cuenca del mismo (Caballero, *et al.* 2013). La paleolimnología es una ciencia multidisciplinaria que usa información de variables físicas, químicas y biológicas procedentes de los sedimentos de los lagos para reconstruir las condiciones ambientales y las comunidades pasadas de estos sistemas (Smol, 2008).

2.2 Indicadores biológicos

Se consideran indicadores aquellos que por su naturaleza física, química o biológica, pueden relacionarse con diferentes variables limnológicas asociadas a diversos eventos climáticos (Wetzel, 1981). De acuerdo con Pinilla (1998), dentro de los indicadores biológicos se encuentran clasificados diferentes especies que nos brindan información sobre las condiciones ambientales específicas y pueden estar asociados a la calidad del agua. Tanto la presencia como la abundancia de éstos indicadores dentro de un medio acuático, nos da evidencia de algún proceso o el estado del sistema en el que se encuentra.

Dentro de los llamados bioindicadores se encuentran el fitobentos y el zoobentos. En el primer grupo se encuentran principalmente las algas planctónicas como son las diatomeas, los dinoflagelados y las cianobacterias. En el segundo grupo se encuentran los cladóceros, los quironómidos, las amebas testadas y los ostrácodos (Cohen, 2003a). Cada uno de estos brinda una interpretación de las características físicas y químicas de un lago. Por ejemplo, los ostrácodos nos ayudan a registrar las variaciones en los niveles del agua de un lago, al igual que los cladóceros, pero suelen ser mejores indicadores de los cambios en la evaporación, la salinidad y las variaciones en la temperatura de la cuenca (Díaz, 2015).

Ostracoda

Según lo expuesto por Baltanás (2015), los ostrácodos se encuentran dentro de la clase Ostracoda, dentro del subphylum Crustacea. El grupo que posee el mejor registro fósil de todos los artrópodos, incluye la subclase Myodocopa (con los órdenes Myodocopida y Halocyprida) y la subclase Podocopa (con los órdenes Platycopida, Podocopida y Palaeocopida). El orden Podocopida incluye todas las especies de ostrácodos propias de aguas dulces y saladas de interior, además de otras muchas especies de ambientes salobres o plenamente marinos.

La clase Ostracoda es muy abundante, con 67,000 especies vivas descritas. Estos crustáceos tienen diferentes formas y estrategias de vida, que pueden ser encontrados en los ambientes acuáticos loticos y lenticos desde la región biogeográfica Paleártica, hasta la Neotropical (Saldarriaga, *et al.* 2010; Karanovic, 2012).

Los ostrácodos no-marinos alcanzan una talla, en su mayoría, que va de los 3 a los 5 mm de largo. Estos presentan un cuerpo sin segmentación y comprimido lateralmente, encerrado dentro de un caparazón bivalvo calcificado y articulado que actúa como elemento protector. Este caparazón puede presentar sedas y ornamentaciones, pero no líneas de crecimiento (Meisch, 2000). Se conocen cerca de 2,000 especies y 200 géneros recientes de ostrácodos no-marinos, siendo Cyprididae (1,000 spp.) y Candonidae (c. 550 spp.) las familias que representan alrededor del 75% de la diversidad total específica (Meisch, 2000).

La clase Ostracoda es un grupo muy antiguo. Se han encontrado registros fósiles en el sedimento lacustre que datan del período Pensilvánico temprano (318.1-299Ma.) (Brusca & Brusca, 2003). En cuanto al registro fósil se refiere, éste es extenso debido a la abundancia del grupo y a la buena preservación de las valvas en el sedimento, las cuales nos ayudan a inferir las condiciones limnológicas controladas por la química del agua, salinidad y variación estacional de la temperatura (Chávez-Lara, 2011).

Presentan una distribución cosmopolita. Su biodiversidad depende de la temperatura, composición del agua, conductividad, salinidad, oxígeno disuelto, estacionalidad y nivel del lago, ya que los ostrácodos son sumamente sensibles a los cambios en estos factores (Smol, *et al.* 2001). Además los elementos traza (en especial Mg y Sr) y el contenido de isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{16}\text{O}$) en las valvas, reflejan las variables limnológicas importantes como la temperatura del agua, la química del agua y la productividad. Más aplicaciones geoquímicas recientes de las valvas de ostrácodos incluyen su uso en el análisis y datación radiométrica, incluyendo radiocarbono y series de uranio (Smol, *et al.* 2001).

En cuanto a su alimentación, estos son definidos como generalistas, es decir, pueden ser herbívoros, carnívoros, carroñeros, filtradores, comensales o parásitos (Karanovic, 2012).

Su reproducción puede ser tanto sexual como partenogénica, dependiendo de las condiciones y recursos del medio en el que se desarrolle. Los ostrácodos dejan huevos. Al eclosionar estos, dan paso a la larva nauplio y al continuar su desarrollo, va dejando una serie de mudas, generalmente 8 veces a lo largo de todo su crecimiento. Se designa a los organismos durante el desarrollo como A para los adultos y el resto de los estadios en orden decreciente de tamaño (“A-1”, “A-2”,..., “A-8”) (Holmes, 2002; Rivas & Hoffmann, 2012) (Figura 1).

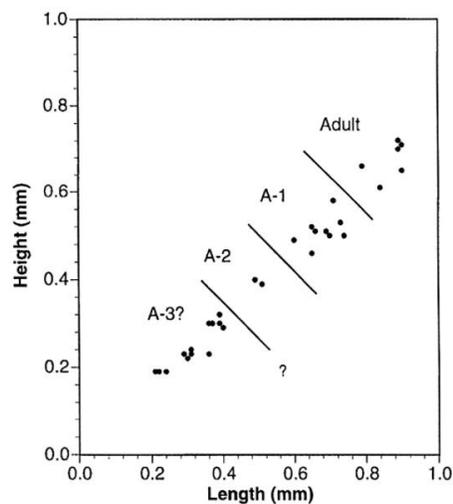


Figura 1. Estadios (relación peso y tamaño) de la clase Ostracoda (Smol, *et al.* 2001)

Las valvas de los ostrácodos se preservan bien y son abundantes en los sedimentos lacustres (Dole-Oliver, *et al.* 2000). Además, cada una de las especies de ostrácodos tienen requerimientos ecológicos específicos que permite a la reconstrucción paleoambiental de las zonas que habitan (Pérez, *et al.* 2010c). El estudio de la fauna fósil que forma parte del registro sedimentario es importante, pues provee de valiosa información bioestratigráfica de ambientes específicos como el Lago T'zi BaNá (Filoh, *et al.* 2016).

2.3 Indicadores no-biológicos

Geoquímica del sedimento

El estudio geoquímico de los sedimentos, el análisis mineralógico, y la composición orgánica e inorgánica del sedimento, nos brindan información para poder realizar el análisis e interpretación de los cambios ambientales en el pasado. De esta manera se pueden cuantificar las interacciones que ocurren entre los diferentes factores que componen el medio ambiente con la descomposición y formación química de los minerales (Roy *et al.* 2006).

Estos análisis dan una vista del intemperismo químico, procesos diagenéticos, la erosión y la evaporación, además del metamorfismo y el estado trófico de un lago, en el contexto de la geología de la zona (Roy *et al.* 2006).

Dentro de los elementos más utilizados para llevar a cabo un estudio geoquímico se encuentran:

- Titanio (Ti): normalmente relacionado a cambios en el transporte de depositación (eólico y pluvial), y es uno de los elementos más inmóviles durante los procesos de intemperismo, lo que nos indica un aporte clástico a la cuenca sedimentaria (Roy, *et al.* 2013).
- Estroncio (Sr): presente en el agua subterránea y en algunos minerales. Éste nos brinda información sobre las fluctuaciones en la evaporación y la salinidad (Roy, *et al.* 2013).

Susceptibilidad magnética

Es una medida de concentración. Sugiere que sus variaciones están relacionadas con los cambios en los insumos litogénicos (acuosos, detríticos y eólicos) durante los ciclos transgresivos-regresivos, lo que a su vez da lugar a cambios en la cantidad de hierro, arcilla y constituyentes ferromagnéticos (Plado, *et al.* 2016). Además, están relacionados con los procesos de intemperismo y erosión (Juárez, 2005).

2.4 Clima en el Holoceno

Los registros paleolimnológicos que reflejan las variaciones climáticas en el continente americano no son abundantes, y la cobertura geográfica y espacial que tienen estos estudios, es irregular. La mayoría de estos trabajos son estudios *multiproxy* que se interpretan en términos de cambios en un supuesto hidrológico para lagos en regiones áridas y subhúmedas, donde la evaporación es un gran componente en el sistema hídrico, y aunque los registros para cuencas individuales reflejan una mezcla de mecanismos climáticos regionales y características de captación específicas, el valor de los registros paleolimnológicos en la reconstrucción de climas pasados a nivel global está bien establecido (Fritz, *et al.* 2001).

En México, la mayoría de los registros se concentran en la parte central, en las cuencas lacustres localizadas en el cinturón volcánico, según Fritz y cols. (2001). Entre los estudios realizados en Michoacán y en el lago de Chalco se interpretó que en el Holoceno medio (~7,500 – 4,500 años AP) dominaron períodos de humedad (~7,000 – 6,000 años AP) con épocas de sequía (~5,500 – 4,600 años AP) (Petrequin, *et al.* 1994; Watts & Bradbury, 1982; Lozano-García, *et al.* 1993). Mismo panorama fue registrado para la Península de Yucatán durante las mismas épocas (Hodell, *et al.* 1995; Leyden, *et al.* 1996).

En un panorama más amplio, se han realizado análisis de los cambios climáticos en Sudamérica durante el Holoceno medio y tardío, como el de la fosa del Cariaco en Venezuela, en el que Haug y cols. (2001) no difieren con lo interpretado en México en el mismo período, mencionando que alrededor de los ~5,400 años AP las condiciones climáticas eran secas con variaciones en la precipitación (~3,800 –

2,800 años AP), mismas que asociaron a los cambios en la latitud media de la Zona de Convergencia Intertropical del Atlántico (ZCIT), mismo que se asocia a períodos cíclicos como son los ciclos de Bond.

Ciclos de Bond

Los ciclos de Bond son eventos fríos ocurridos cada ~1,500 años durante el Holoceno, basados en estudios de granos teñidos con hematita acarreados por el deshielo hacia Atlántico Norte (Bond, *et al.* 2001; Mayewski, *et al.* 2004), considerados también los equivalentes interglaciares de los ciclos de Dansgaard-Oeschger, los cuales consisten en aumentos de temperatura (de 5 a 8°C) en periodos cortos de tiempo (Uriarte, 2003). Los ciclos de Bond son momentos en los cuales existieron descargas de hielo en las aguas del Atlántico, los cuales causan una disminución en la Temperatura Superficial del Atlántico Norte (TSAN), causando un desplazamiento en la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) hacia el sur, asociado a la ralentización de la corriente superficial del Atlántico, generando en teoría, periodos de sequía al norte de los Neotrópicos (Franco-Gaviria, 2014; Haug, *et al.* 2001).

3. ANTECEDENTES

En la región Neotropical existe una amplia serie de sistemas acuáticos entre los que se encuentran lagos con edades que van más allá del Holoceno, como son el lago Titicaca en Perú (Lavenu *et al.*, 1989) y el lago Petén Itzá en Guatemala (Pérez *et al.* 2010), entre otros. Al norte del Neotrópico, principalmente en México existen estudios paleolimnológicos en lagos tanto de tierras altas (~1,000 - 1,500 msnm) como bajas (~110 – 500 msnm) (Echeverría, 2016), sin embargo son pocos los estudios realizados en tierras medias (~500 – 920 msnm), como los que se encuentran en la Selva Lacandona en Chiapas.

Entre los pocos estudios paleoambientales orientados a lagos de altitudes medias está el del Lago Ocotálito ubicado en la Selva Lacandona, donde se realizó una reconstrucción ambiental (~9,000 años), que al igual que en el presente estudio, estuvo basado en el análisis de ostrácodos tanto fósiles como actuales (Díaz, *et al.* 2017). Además se realizó un análisis de la geoquímica elemental y los isótopos estables. Los resultados del estudio mostraron la identificación de seis especies fósiles y cinco especies modernas de ostrácodos tanto bentónicas como nectobentónicas, siendo la más representativa *Cytheridella ilosvayi*, dando fluctuaciones de $\delta^{18}\text{O}$, las cuales indicaron dos eventos secos, con conductividades y niveles del lago variables (Díaz, *et al.* 2017). Otro reporte de lagos de altitudes medias, es el estudio de la reconstrucción paleoambiental durante el Holoceno en el Lago Lacandón que pertenece al sistema de lagos de la Selva Lacandona, donde estudiaron al grupo de los cladóceros. Los resultados muestran la identificación de 16 especies de cladóceros, pertenecientes a las familias Bosminidae y Chydoridae, además del análisis de susceptibilidad magnética y geoquímica del sedimento, mostró que las fluctuaciones ambientales son resultado, quizá, de los cambios en el régimen de humedad lo que afecta a las comunidades de cladóceros (Vázquez, *et al.*, 2016).

Existen otros estudios en los que se han analizado otro tipo de indicadores lacustres (bioindicadores terrestres y no-biológicos), como el realizado en el Lago Ocotálito, un estudio *multiproxy* en el cual se analizó el polen, la geoquímica y la

susceptibilidad magnética para identificar cuáles son los eventos climáticos que condiciona la dinámica de la vegetación durante los últimos 9,540 años AP. Los resultados de estos análisis permitieron observar cambios importantes en las condiciones ambientales durante el Holoceno, con transiciones de ambientes más húmedos a condiciones climáticas más secas, inferidas a partir del cambio en el registro polínico (Franco-Gaviria, 2014).

Dentro de los reportes de estudios la fauna actual de lagos situados en tierras bajas y altas de México se encuentra el estudio *multiproxy* de la Península de Yucatán donde se estudiaron diatomeas (282 spp.), quironómidos (66 morfoespecies) y microcrustáceos entre los que destacan los copépodos (6 calanoides de agua dulce), los cladóceros (51 spp.) y los ostrácodos (29 spp. no-marinas), obteniendo que estos indicadores son altamente sensibles a cambios en la composición química como en la conductividad, y estado trófico del lago. Además utilizaron funciones de transferencia para inferir las condiciones ambientales del pasado, observando que la distribución y diversidad de los indicadores se ve influenciada por factores como la precipitación, la altitud, la química del agua el estado trófico y el impacto humano (Pérez, *et al.* 2013).

En cuanto a investigaciones recientes de la microfauna actual en las cercanías de Chiapas, se encuentra el estudio de la comparación en la composición de especies de ostrácodos, su abundancia y riqueza en lagos de tierras bajas y altas (gradiente altitudinal) de Guatemala, en el que se obtuvieron cuatro especies restringidas al altiplano, once en tierras bajas y siete especies compartidas en ambas áreas. Observaron que la riqueza y diversidad de especies son similares tanto en el lago del altiplano como en tierras bajas. Así mismo, encontraron especies con tolerancia hidroquímica y distribución amplia como *Darwinula stevensoni* y *Physocypria globula* (Pérez, *et al.* 2012).

Recientemente, se realizó un estudio de ostrácodos modernos en 27 cuerpos de agua de la Selva Lacandona, Montebello y El Petén, empleando un gradiente altitudinal. Se obtuvieron 51 muestras que demuestran que las variables de conductividad y precipitación explicaban el 71% de la variabilidad en la química del

agua. Este estudio es el primero en el que *Potamocypris* sp. se reporta para tierras medias como es la Selva Lacandona. Además, identificaron que *Darwinula stevensoni*, *Cypridopsis vidua* y *Cytheridella ilosvayi* son de las especies más tolerantes a cambios ambientales como la temperatura y la química del agua, ya que se encontraron distribuidas a lo largo de todo el gradiente y fueron muy abundantes. También se concluyó que es en las tierras bajas, cálidas y húmedas, en donde se encuentra la mayor riqueza de especies, siendo la información generada, de utilidad en estudios paleoecológicos o paleoclimáticos (Echeverría, 2016).

En reportes que tratan únicamente sobre la cuenca del lago T'zi BaNá está el estudio realizado por la CONANP en el 2006 en el Área de Protección de Flora y Fauna Metzabok, en el cual se exponen generalidades de la cuenca (hidrografía, clima, flora y fauna, geología, etc.) y una descripción general sobre la problemática ambiental existente en esta zona, justificando así su nombramiento como Área Natural Protegida.

4. JUSTIFICACIÓN

De acuerdo con la CONANP (2006), el Lago T'zi BaNá es un cuerpo de agua importante para la región de la Selva Lacandona por ser el lago de mayor extensión dentro de la región. Alberga una gran biodiversidad y es origen de aportaciones de agua para la cuenca del sistema hidrológico del Usumacinta, y es el sitio principal de captación de agua a través del manto calizo, siendo determinante en la dinámica geohidrológica.

Se han realizado estudios actuales sobre la flora y fauna del lago (CONANP, 2006), dejando de lado las reconstrucciones paleoambientales y paleoclimáticas, estos estudios son importantes porque ayudan a comprender la variabilidad climática y cambios ambientales naturales o antropogénicos en el norte del Neotrópico, así como el efecto que estos cambios han tenido sobre las comunidades acuáticas.

Este estudio es uno de los estudios pioneros en lagos de tierras de altitud media basado en el análisis de ostrácodos fósiles e indicadores no-biológicos. Esto contribuye a llenar el vacío de información existente para esas zonas, permitiendo conocer las dinámicas del lago y sus alrededores, y la comparación del cambio climático y ambiental a diferentes escalas de tiempo en un gradiente altitudinal continuo.

Toda la información generada sobre la evolución ambiental del Lago T'zi BaNá, será de interés para las comunidades lacandonas, y autoridades locales y regionales, ya que servirá como base para un mejor manejo y conservación del lago y sus alrededores.

5. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- ¿Cómo ha sido la variabilidad ambiental en el Lago T'zi BaNá en la Selva Lacandona, Chiapas durante los últimos ~7000 años AP?
- ¿Cómo han ido cambiando los ensamblajes de ostrácodos a través del Holoceno medio y tardío en el Lago T'zi BaNá, y cuáles son las variables ambientales que posiblemente originaron estos cambios?
- ¿Cómo se correlaciona el registro climático del Lago T'zi BaNá con otros reportados en el Neotropico (Ocotálito, Lacandón, Cobá, San José Chulchacá, Petén Itzá, Cariaco, Caribe)?

6. OBJETIVOS

General

- Reconstruir la historia paleoambiental de los últimos ~7000 años, del Lago T'zi BaNá en la Selva Lacandona, Chiapas, México, por medio de un estudio combinado de indicadores biológicos (Crustacea: Ostracoda) y no-biológicos en sedimentos lacustres.

Particulares

- Identificar las especies fósiles de ostrácodos en una secuencia sedimentaria extraída del Lago T'zi BaNá y determinar sus abundancias absolutas.
- Describir la respuesta de las comunidades acuáticas de un lago de altura media al cambio climático durante el Holoceno, tomando en cuenta la información actual de las especies.
- Comparar los resultados obtenidos de los indicadores biológicos y no-biológicos (susceptibilidad magnética y geoquímica) del Lago T'zi BaNá.

7. HIPÓTESIS

La variable principal que rige la distribución de los ostrácodos en el Lago T'zi BaNá, que es kárstico y de media altura, es la profundidad, puesto que el lago en la actualidad tiene una variación en los niveles de 10 m anuales. Misma variable será determinada por las altas abundancias de *Physocypria* sp. y *Strandesia intrepida*, asociadas al aumento y al descenso en la profundidad, respectivamente, durante el Holoceno medio.

8. ÁREA DE ESTUDIO

La Selva Lacandona se localiza en las montañas del oriente de Chiapas, entre los municipios de Las Margaritas, Altamirano, Ocosingo y Palenque, y los municipios recientemente formados de Maravillas, Tenejapa, Marqués de Comillas y Zamora Pico de Oro. La región cuenta con un complejo sistema hidrológico que abarca el 53% de la cuenca del río Usumacinta. Los cuerpos de agua presentes en la región son las lagunas perennes: Miramar, Santa Clara, Ocotal, Suspiro, Guineo, Lacanjá, Metzabok, Ojos Azules, entre otros y las lagunas intermitentes Carranza y Tujen (Villanueva, 2010).

El Lago T'zi BaNá se encuentra dentro del Área de Protección de Flora y Fauna, Metzabok. Su litología está compuesta principalmente por rocas de origen sedimentario como calizas y areniscas, siendo las calizas las predominantes, originadas en el Cretácico superior. Esta región se encuentra en la porción noreste de la región conocida como Selva Lacandona. El Área de Protección cuenta con una superficie de 3,368 – 3,588 ha, localizada geográficamente entre los paralelos 17°08'36" y 17°04'53" de latitud norte y los 91°34'42" y 91°40'09" de longitud oeste; colinda al Norte con el ejido Cristóbal Colón, al sur con el ejido Agua Dulce Tehuacán, al este con el ejido Damasco y al oeste con el ejido El Tumbo, Municipio de Ocosingo, en el Estado de Chiapas, México (CONANP, 2006).

En la microregión de Metzabok el clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano. La precipitación total anual es de 1,862 mm que se distribuyen en dos períodos bien definidos: uno de alta humedad y otro de relativa sequía. Durante el período húmedo (de mayo a diciembre) llueve un total de 1,716 mm, que representan el 92 % de la precipitación total anual, mientras que el 8% restante (146 mm) se distribuye en precipitaciones ligeras asociadas a los nortes, sobre todo entre los meses de enero y febrero, mientras que marzo y abril son los más secos, identificados como cuaresma, con precipitaciones escasas (CONANP, 2006).

El Lago T'zi BaNá se encuentra localizado a una latitud de 17°7'11" N y 91°37'9" W, a una altitud de 542 msnm. Cuenta con una profundidad máxima 51 m. Tiene una transparencia de 2.06 m (disco de Secchi) y un pH de 6.8 en su parte más profunda. Cuenta con una temperatura promedio de 23.6°C (Agosto 2013; Pérez, com. personal) (Figura 2).

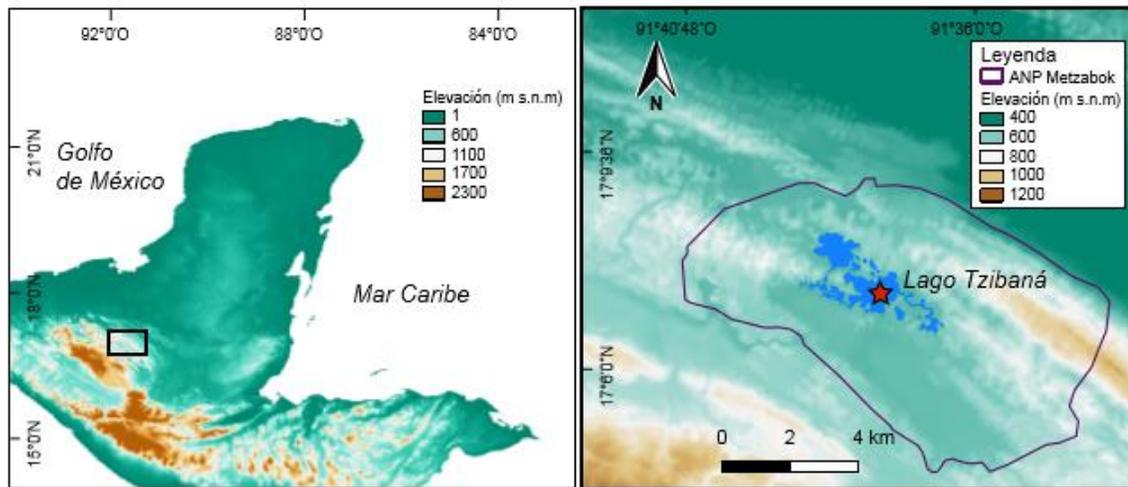


Figura 2. Localización del sitio de estudio. En la imagen de la izquierda se observa en el recuadro negro la ubicación geográfica y la elevación a la que se encuentra el Lago T'zi BaNá. Del lado derecho se muestra el punto específico en el que encuentra el Lago T'zi BaNá dentro del Área de Protección de Flora y Fauna Metzabok.

9. MÉTODO

9.1 Trabajo en campo

En junio del 2013 el grupo de investigadores del laboratorio de Paleoecología y Cambio Climático, del Departamento de Paleontología, del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México obtuvo una secuencia sedimentaria de ~3.67 m de longitud del Lago T'zi BaNá a una profundidad de 17 m con una sonda de pistón Livingston modificada (Colinvaux, *et al.* 1999). El núcleo sedimentario se compone de 5 drives de aproximadamente 1 m cada uno, y se separó longitudinalmente, para posteriormente ser analizadas en el laboratorio.

9.2 Trabajo de laboratorio

Los sedimentos de cada secuencia sedimentaria fueron descritos litológicamente. De cada uno fueron tomadas muestras utilizadas para estudios geoquímicos y análisis de la susceptibilidad magnética, la cual fue medida en intervalos de 1 cm, con un susceptibilímetro marca Bartington modelo MS3, y un sensor MS2E de 0.46 KHz con una resolución máxima de 2×10^{-5} SI.

Para el análisis multielemental, se realizó la medición de los elementos traza directamente del sedimento a través de un Analizador de Fluorescencia de Rayos X (FRX) NITON XL3t-Thermo Scientific.

Para asignar una cronología al núcleo del Lago T'zi BaNá, se fecharon muestras de material carbonizado, remanente vegetal y material orgánico, tratados bajo el método de ácido-base-ácido en el Laboratorio BETA ANALYTIC. Estas muestras se analizaron por separado, siendo el material orgánico el que dio las 3 fechas mostradas en la Tabla 1 en las que se basó el modelo de edad. En este laboratorio se emplea la técnica de espectrometría de masas para estimar de forma absoluta las fechas de radiocarbono. Con las fechas obtenidas se construyó un modelo de edad-profundidad con el programa BACON (Blaauw & Christen, 2011).

Posteriormente, de cada secuencia se extrajeron muestras de sedimento cada 4 cm, obteniendo 1 cm³. Posteriormente se pesó 1 g. de cada muestra de sedimento, el cual fue tamizado utilizando una malla de 63 µm de abertura,

recuperando los residuos acumulados en la parte superior del tamiz con agua destilada en una caja Petri desechable. Cada muestra fue observada al microscopio estereoscópico Olympus SZX7 a un aumento de 3.2. Para la recolección de valvas y caparazones de ostrácodos, fue necesario utilizar un pincel fino. Las valvas fueron extraídas y colocadas en placas micropaleontológicas, siendo contabilizadas y separadas por la cantidad de valvas de adultos intactas (AVI), valvas de adultos rotas (AVR), valvas de juveniles intactas (JVI) y valvas de juveniles rotos (JR). De igual manera, los caparazones fueron separados y clasificados de la siguiente manera: caparazones de adultos intactos (ACI), caparazones de adultos rotos (ACR), caparazones de juveniles intactos (JCI) y caparazones de juveniles rotos (JCR). Los resultados se presentan como número de valvas/caparazones por 1 g. de sedimento.

La identificación taxonómica fue basada en las características morfológicas de las valvas, observando tamaño, forma, ornamentación y presencia de pústulas, basándose principalmente en Pérez, (2010a), Pérez, *et al.* (2010b), Meisch (2000) y Karanovic (2012), y posteriormente se les fotografió en un Microscopio Óptico de Barrido, con apoyo de la M. en C. Berenit Mendoza Garfias.

Para los análisis estadísticos se elaboró un Análisis de Correspondencia sin tendencia (DCA) en el programa R (R Core Team, 2013). Este análisis produce un re-escalamiento dimensional de la base de datos, simplificando la interpretación de la información. Es un método multivariado de ordenamiento que agrupa a las especies en un espacio ordenado, permitiendo representar la dispersión de los objetos en un diagrama multidimensional, con tantos ejes como descriptores en el estudio (Ahmad, 2010; Legendré & Legendré, 1998). En este tipo de análisis se observa el cambio ecológico de las especies, la tasa y la velocidad a la que estas responden a las variaciones ambientales, tomando en cuenta la más significativa, que en este caso sería, observando la abundancia y la diversidad de especies (Hill, 1980).

Cuando se tiene un conjunto de datos fósiles, las técnicas multivariadas ofrecen la posibilidad de interpretar un resumen de estos datos para reconstruir las

condiciones ambientales reflejadas por los *proxies* fósiles (Correa-Metrio, *et al.* 2014). Dicha interpretación se basa principalmente en el conocimiento previo del investigador, considerándose una excelente técnica para resumir cambios ecológicos a través del tiempo (Correa-Metrio, 2014; Lepš & Šmilauer, 2003). Es en estos análisis estadísticos en los que se basó la identificación de 4 períodos de tiempo o zonas, señalados en números romanos, principalmente en los cambios de las representaciones estratigráficas del DCA, en conjunto con los cambios observados de las variables no-biológicas. Esta zonación permite una mejor descripción y comprensión de las condiciones ambientales reflejadas en el registro sedimentario.

10. RESULTADOS

10.1 Modelo de edad

La cronología del registro sedimentario de T'zi BaNá está basada en 3 fechas a partir de la datación del material orgánico extraído (Tabla 1).

Tabla 1. Datación del núcleo obtenido del Lago T'zi BaNá en el que se muestran las 3 fechas en las que se basó el modelo de edad en conjunto con la profundidad a la que se encuentra.

Código beta	LabID	Edad (cal AP)	Error (+/-)	Profundidad (cm)
394171	TZI-91	3,250	30	91.92
372421	TZI-43	5,060	30	257.33
394173	TZI-62	5,670	40	410.54

En la Figura 3 se presentan los datos del modelo de edad del núcleo TZI 13-III del Lago T'zi BaNá, en la cual se puede observar dentro del círculo naranja una extrapolación a la superficie. Tomando en cuenta el método de muestreo, es posible que en la parte superior de la secuencia sedimentaria se perdió alrededor de ~1,000 a ~2,000 años AP. De esta manera, se ajustó el modelo de edad desde ~2,500 a ~7,000 años cal AP.

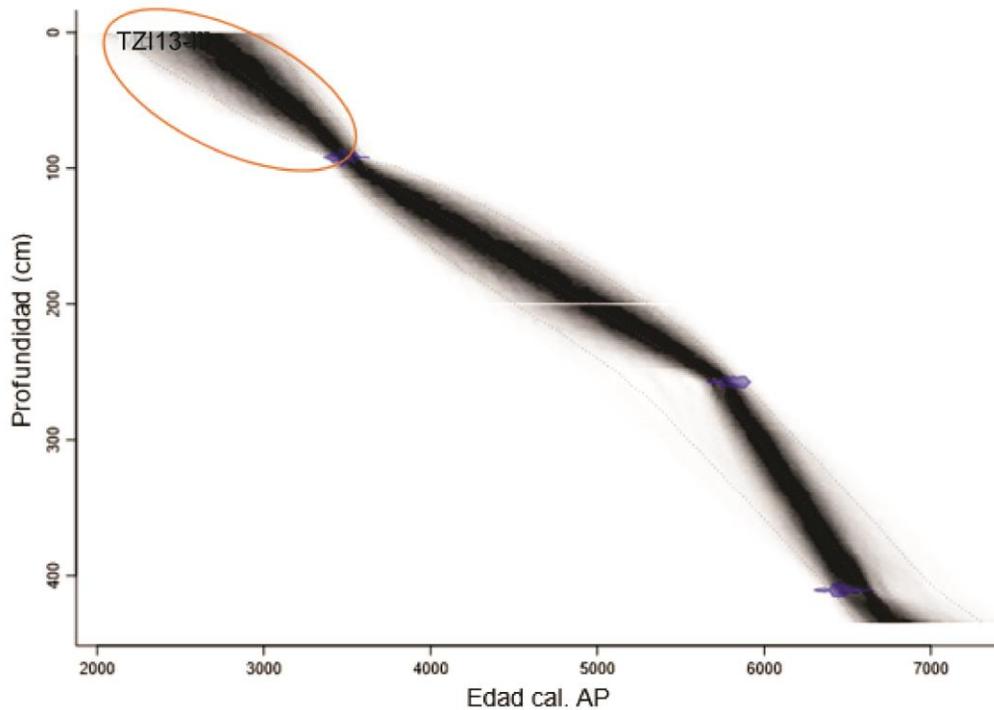


Figura 3. Modelo de edad del registro sedimentario. En el eje Y se presenta la profundidad en centímetros (cm) y en el eje de las X se muestran las edades en años calibrados antes del presente (cal AP). El círculo naranja hace referencia a una extrapolación a la superficie debido al sedimento perdido. En los puntos azules se muestran las tres fechas en las que se basó el modelo de edad dadas en la Tabla 1.

10.2 Descripción litológica y susceptibilidad magnética

Perfil litológico

En el registro sedimentario analizado dominaron la presencia de limos y arcillas con inclusiones de conchas, con variaciones en color de tonos marrones y grises. Es hasta los ~350 cm de la secuencia sedimentaria total en la que se registró la presencia de arenas (Figura 4).

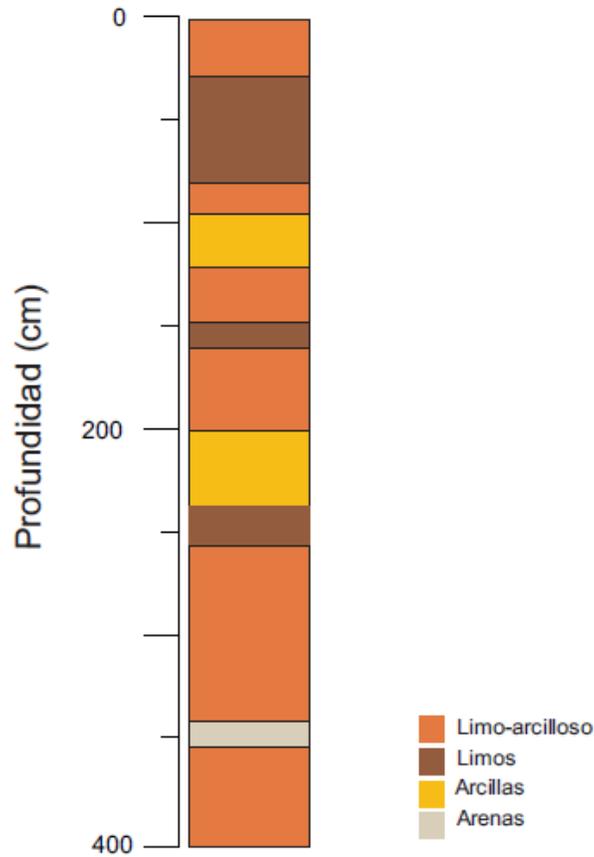


Figura 4. Perfil litológico del núcleo TZI13-III obtenido del Lago T'zi BaNá, Selva Lacandona, Chiapas.

Susceptibilidad magnética

En la Figura 5 se muestran los momentos de mayor ingreso de minerales magnéticos al lago. Se pueden observar tres periodos en los que la escorrentía y por tanto, la erosión aumentaron significativamente: ~5,000 cal AP, de los ~4,250 a los ~3,500 cal AP y el tercero, incrementando gradualmente, desde los ~3000 cal AP a la actualidad.

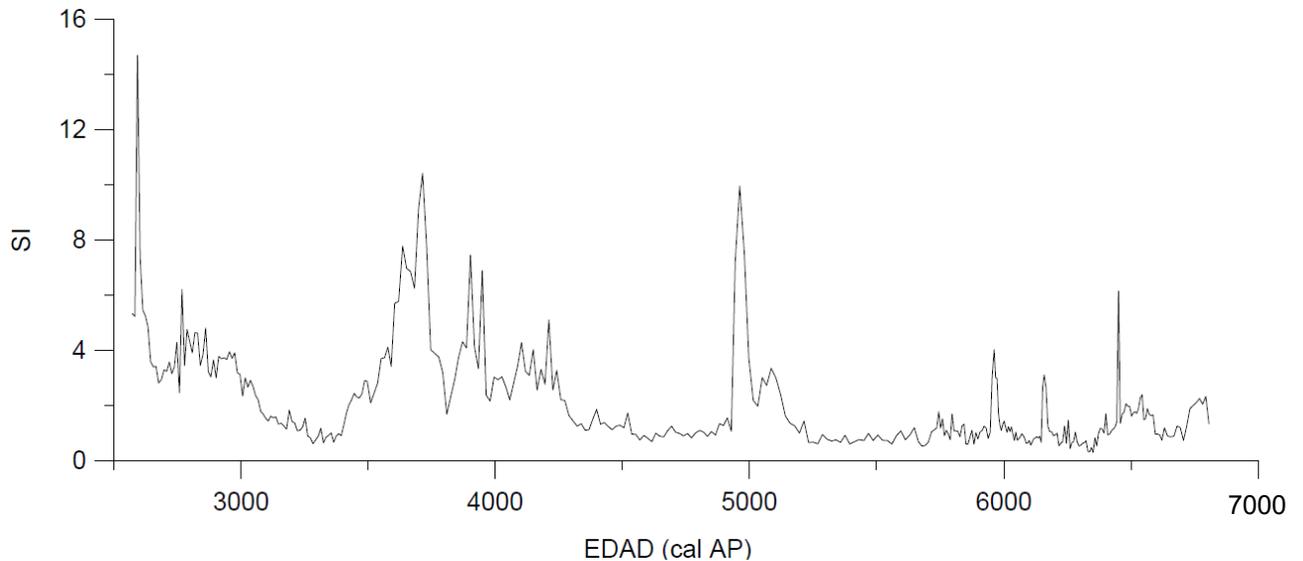


Figura 5. Susceptibilidad magnética (SM) a lo largo del tiempo. En el eje X se presentan las edades calibradas antes del presente (cal AP) y en el eje Y la escala en SI. Se muestran las oscilaciones de los valores de la SM en los momentos de mayor entrada de material magnético (detrítico) en los picos altos y la menor entrada de este material en los picos más bajos.

10.3 Geoquímica de sedimentos

A continuación se muestran las concentraciones de diferentes elementos traza presentes en el registro sedimentario, entre los que se encuentran: estroncio (Sr) y titanio (Ti) (Figura 6), todos comparados con la susceptibilidad magnética (SM). De manera general, se identificaron tres períodos en los que el Ti y la SM aumentaron considerablemente (6,000, 5,700 y 4,900 años AP), siendo el de alrededor de los 4,900 años AP el más grande.

Zona I (~7,000-6,500 años AP): Dominada por las concentraciones de Sr, correlacionándose de manera negativa con las concentraciones de Ti. La susceptibilidad magnética (SM) aumentó justo cuando el Sr disminuye.

Zona II (~6,500-4,200 años AP): Continuó la misma tendencia, cuando el Sr aumenta, el Ti y la SM disminuyen, mostrándose un incremento en tres períodos de estos dos últimos.

Zona III (~4,200-3,450 años AP): Las concentraciones de Ti tienen un aumento justo en el tiempo donde las concentraciones del Sr bajan. Estos cambios son dados de manera abrupta.

Zona IV (3,450-2,500 años AP): Comenzó a darse una leve tendencia al incremento del Ti y la SM, sin embargo, la zona fue dominada por las altas concentraciones de Sr.

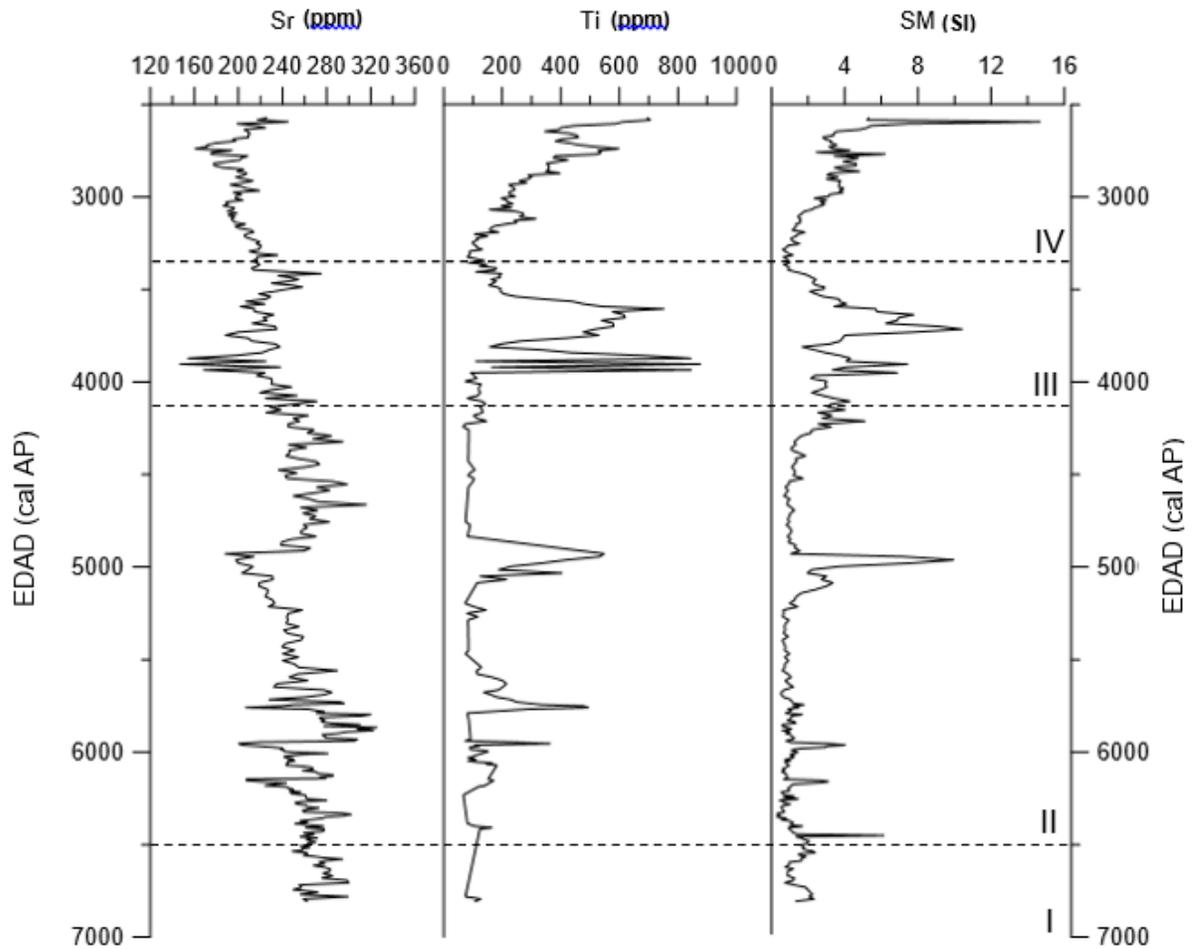


Figura 6. Concentraciones de los elementos traza medidas en la secuencia sedimentaria TZ113-III, a través de la edad del registro sedimentario. En el eje X se muestran las concentraciones en partes por millón (ppm) para el caso del Ti y el Sr, y la cantidad de material magnetizado para el caso de la SM; en el eje Y se muestran los años calibrados antes del presente (cal AP).

10.4 Clasificación y ecología de Ostracoda

Se identificaron 9 especies de ostrácodos no-marinos en el Lago T'zi BaNá, Chiapas. A continuación se presenta la clasificación taxonómica a la que pertenecen:

CLASE OSTRACODA Latreille, 1806

ORDEN PODOCOPIDA Sars, 1866

Suborden Podocopina Sars, 1866

Infraorden Cypridocopina Jones, 1901

Superfamilia Cypridoidea Baird, 1845

Familia Candonidae Kaufmann, 1900

Subfamilia Candoninane Kaufmann, 1900

Género: *Pseudocandona* Kaufmann, 1900

Pseudocandona annae Méhes, 1914

Subfamilia Cyclocypridinae Kaufmann, 1900

Género: *Physocypria* Vera 1897

Physocypria sp.

Familia Cyprididae Baird, 1845

Subfamilia Cypricercinae McKenzie, 1971

Género: *Strandesia* Stuhlmann, 1888

Strandesia intrepida Furtos, 1936

Subfamilia Cypridopsinae Kaufmann, 1900

Género: *Cypridopsis* Brady, 1868

Cypridopsis vidua Müller, 1776

Género: *Potamocypris* Brady, 1870

Potamocypris sp.

Subfamilia Cyprinotinae Bronshtein, 1947

Género: *Heterocypris* Claus, 1893

Heterocypris punctata Keyser, 1975

Infraorden Cytherocopina Gründel, 1976

Superfamilia Cytheroidea Baird, 1850

Familia Limnocytheridae Klie, 1983

Subfamilia Limnocytherinae Klie, 1938

Género: *Limnocythere* Brady, 1868

Limnocythere sp.

Subfamilia Timiriaseviinae Mandelstam, 1960

Género: *Cytheridella* Daday, 1905

Cytheridella ilosvayi Daday, 1905

Infraorden Darwinulocopina Sohn, 1988

Superfamilia Darwinuloidea Brady and Norman, 1889

Familia Darwinulidae Brady and Norman, 1889

Género: *Darwinula* Brady and Robertson, 1885

Darwinula stevensoni Brady and Robertson, 1870

(Modificado de Pérez, 2010; Meisch, 2000; Cohuo, *et al.* 2016)

A continuación se presentan los hábitos ecológicos en los que se han presentado las 9 especies de ostrácodos identificadas a lo largo del núcleo (Tabla 2).

Tabla 2. Ecología de las especies identificadas del Lago T'zi BaNá (Modificado de Pérez, *et al.* (2010a).

Especies	Hábitos ecológicos	Profundidad
<i>Physocypria</i> sp.	Nectobentónica	Aguas profundas (~50-60 m)
<i>Limnocythere</i> sp.	Bentónica	Desde zonas litorales hasta los 40 m
<i>Pseudocandona annae</i>	Bentónica	Aguas someras, menores a 15 m de profundidad
<i>Cytheridella ilosvayi</i>	Bentónica	Aguas someras, menores a 40 m de profundidad
<i>Darwinula stevensoni</i>	Bentónica	Aguas someras, menores a 15 m de profundidad

<i>Strandesia intrepida</i>	Nectobentónica	Aguas someras
<i>Heterocypris punctata</i>	Nectobentónica	Zonas litorales
<i>Cypridopsis vidua</i>	Nectobentónica	Zonas litorales
<i>Potamocypris</i> sp.	Nectobentónica	Zonas litorales

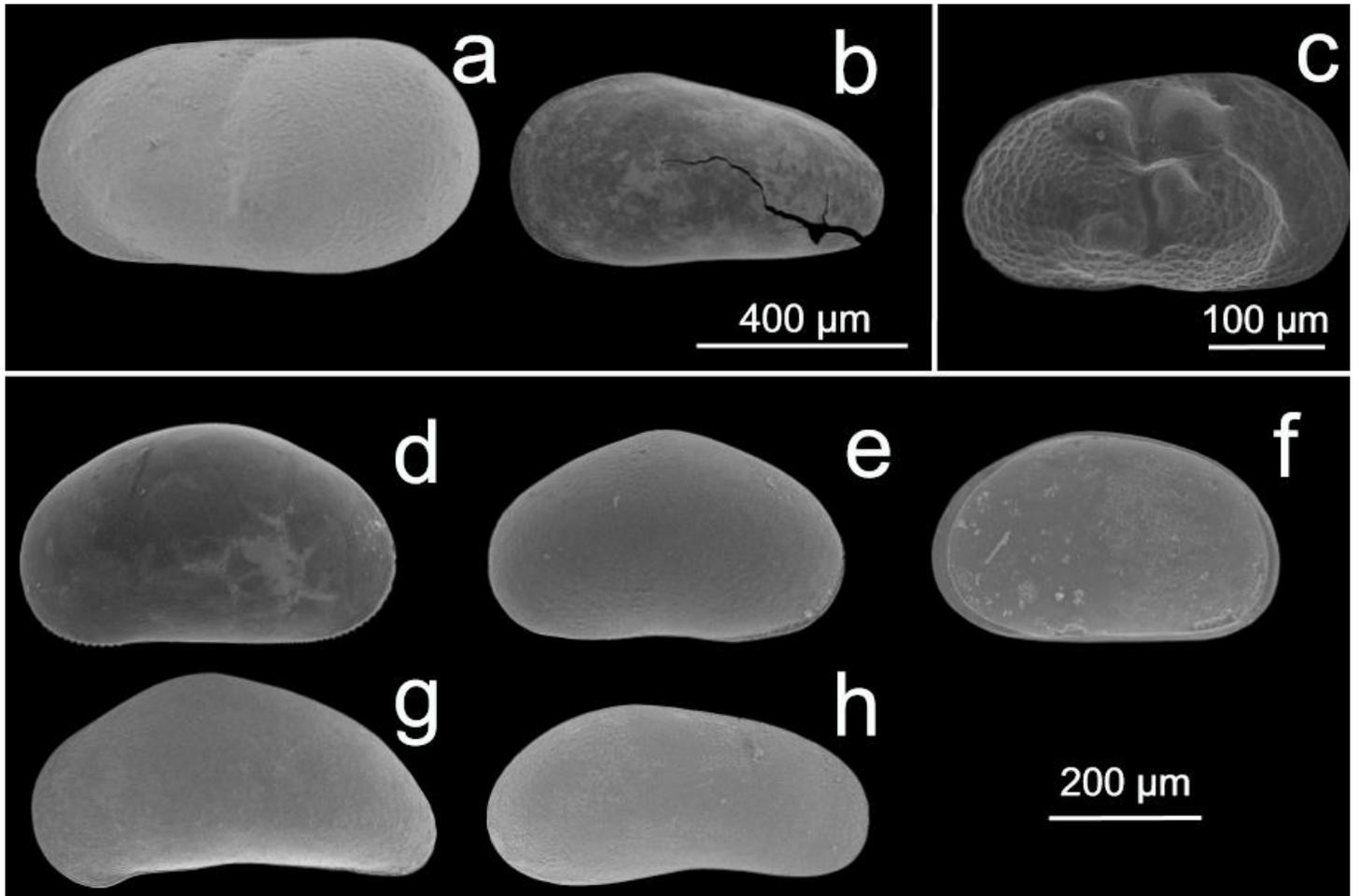


Figura 7. Lámina fotográfica de ostrácodos del Lago T'zi BaNá, utilizando Microscopía Electrónica de Barrido. (a) *Cytheridella ilosvayi* valva izquierda (VI), vista externa (VE); (b) *Strandesia intrepida* VI, VE; (c) *Limnocythere* sp. valva derecha (VD), VE; (d) *Heterocypris punctata* VI, VE; (e) *Cypridopsis vidua* VD, VE; (f) *Physocypris* sp. VD, vista interna (VIn); (g) *Potamocypris* sp. VI, VE; (h) *Pseudocandona annae* DV, VE.

10.5 Abundancias de especies bentónicas y nectobentónicas

En la Figura 8 se muestra la abundancia absoluta de las 9 especies de ostrácodos encontradas, identificándose cuatro zonas basadas en los cambios en las concentraciones de Sr:

Zona I (~7,000-6,500 años cal AP): Se observó la mayor abundancia de especies. Dentro de las especies bentónicas se encontró *Cytheridella ilosvayi* como una de las más abundantes (2014 valvas/1g.). De las que se encuentran en las nectobentónicas, la más abundante fue *Physocypria* sp. (254 valvas/1 g.).

Zona II (~6,550-4,200 años cal AP): En esta zona se observó la mayor cantidad de cambios. Se tienen oscilaciones en la abundancia de las especies, siendo más notoria la abundancia de *Physocypria* sp. (2,412 valvas/1g.) y la de *Darwinula stevensoni* (1,389 valvas/1 g.).

Zona III (~4,200-3,450 años cal AP): Esta zona se caracterizó por el decaimiento en las abundancias de todas las especies de ostrácodos. Sin embargo, *Physocypria* sp. estuvo presente y abundante con 452 valvas/1 g.

Zona IV (3,450-2,500 años cal AP): El mismo patrón que caracterizó a la zona III se observó en la zona IV. Sin embargo, la presencia de *Cytheridella ilosvayi* con 232 valvas/1g. es característica de la zona.

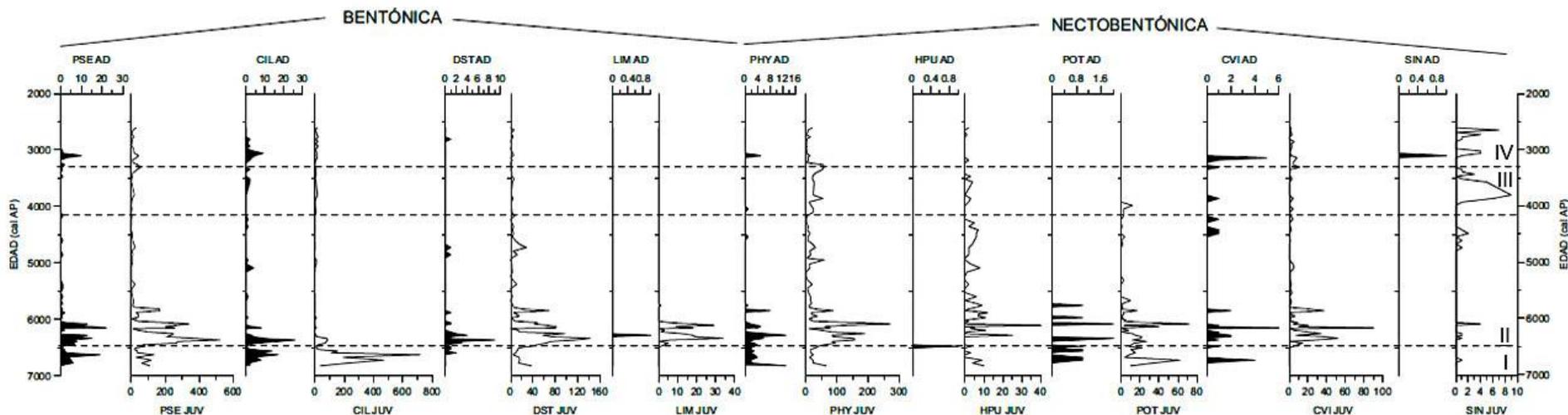


Figura 8. Abundancias absolutas de las especies de ostrácodos presentes en el Lago T'zi BaNá. El eje X se caracteriza por ser las edades cal AP y los ejes Y por ser las abundancias de cada una de las especies. Estas se muestran por hábitos ecológicos (bentónicas y nectobentónicas), diferenciadas en adultas (líneas negras) y en juveniles (líneas blancas); con cuatro zonas identificadas. Códigos de especies: PSE (*Pseudocandona annae*), CIL (*Cytheridella ilosvayi*), DST (*Darwinula stevensoni*), LIM (*Limnocythere* sp.), PHY (*Physocypris* sp.), HPU (*Heterocypris punctata*), POT (*Potamocypris* sp.), CVI (*Cypridopsis vidua*), SIN (*Strandesia intrepida*).

10.6 Abundancias totales de adultos y juveniles

Tomando en cuenta tanto los conteos totales de las valvas juveniles rotas e intactas, como de las adultas rotas e intactas, en la Figura 9 se muestran los valores totales del número de valvas de ostrácodos. Es posible observar una tendencia, en el que la abundancia de valvas juveniles e intactas es mucho mayor.

Zona I (~7,000-6,500 años cal AP): existió una abundancia relativamente alta, siendo las valvas intactas y juveniles (TVJUVI) las más abundantes.

Zona II (~6,500-4,200 años cal AP): se observó la abundancia más alta en cada uno de los totales presentados, sin embargo, la mayor cantidad de valvas son las juveniles intactas y, en general, el total de valvas intactas (TVI). Aproximadamente a los ~5,200 cal AP, se comenzó a observar un descenso los totales, sin embargo, a los ~5,400 cal AP, se observa un incremento en el total de valvas rotas (TVR).

Zona III (~4,200-3,450 años cal AP): Se da una baja considerable en el número de valvas en toda la zona. Está disminución en la abundancia es más notable tanto en el total de valvas adultas rotas (TVADR) como en las adultas intactas (TVADI).

Zona IV (3,450-2,500 años cal AP): Se observó que el total de valvas de adultos, tanto rotos como intactos, aumentó en comparación con las valvas juveniles, siendo el incremento más significativo alrededor de los ~3,100 cal AP.

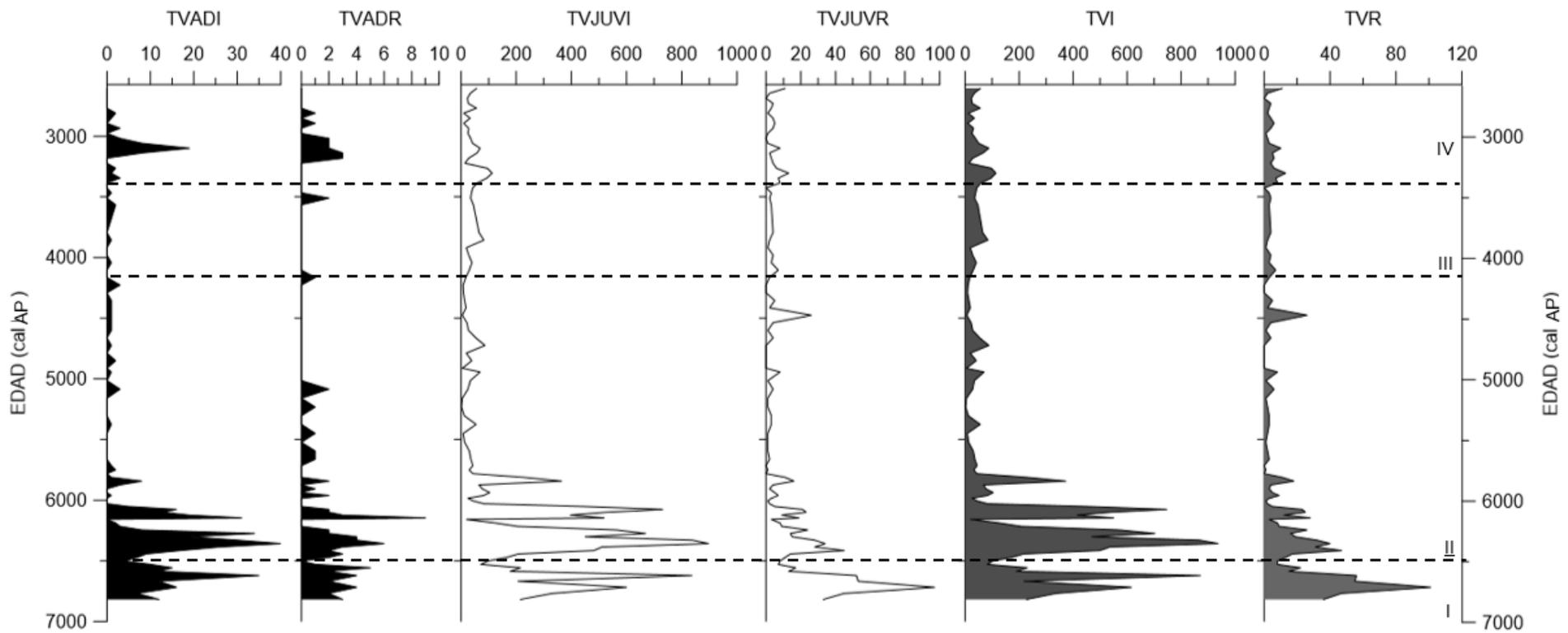


Figura 9. Total de conteos de valvas encontradas. En el eje X se muestran los años calibrados antes del presente (cal AP) y en el eje Y las abundancias de los totales. Se observan el total de valvas adultas tanto intactas como rotas (curvas negras), el total de valvas juveniles rotas e intactas (curvas blancas) y el total de valvas rotas e intactas (curvas grises) donde se contaron sin diferenciar las valvas entre adultas y juveniles. Códigos: AVI (valvas adultas intactas), JVI (valvas juveniles intactas), AVR (valvas adultas rotas), JVR (valvas juveniles rotas), TVI (total de valvas intactas), TVR (total de valvas rotas), TVAD (total de valvas adultas) y TVJUV (total de valvas juveniles).

10.7 Análisis estadísticos (DCA)

El análisis de DCA agrupó a las especies encontradas en este estudio, y con base en la revisión bibliográfica de las preferencias ecológicas de cada especie como criterio para la determinación de las variables ambientales de importancia, se interpretó que la temperatura del lago es la variable que rige al Eje 1 (Figura 10). En los cuadrantes I y IV se encuentran las especies afines a temperaturas más cálidas (*Cytheridella ilosvayi*, *Potamocypris* sp., *Strandesia intrepida*) y en los cuadrantes II y III se sitúan las especies con afinidad a temperaturas más frías (*Physocypris* sp., *Heterocypris punctata*, *Limnocythere* sp.). El Eje 2 aparentemente asociado con la profundidad del lago, interpretado bajo el mismo criterio mencionado anteriormente. En los cuadrantes I y II se sitúan las especies con mayor afinidad a profundidades de intermedias a bajas (*Strandesia intrepida*, *Heterocypris punctata*, *Physocypris* sp.), y en los cuadrantes III y VI se ordenaron las especies con afinidad a pocas profundidades o cercanas a litorales (*Cypridopsis vidua*, *Limnocythere* sp., *Pseudocandona annae*). Los ejes del DCA fueron caracterizados por las especies más abundantes o cuya presencia brinda mayor información, lo que permite identificar las variables ambientales que se asocian a ellas (Alcaraz, 2013).

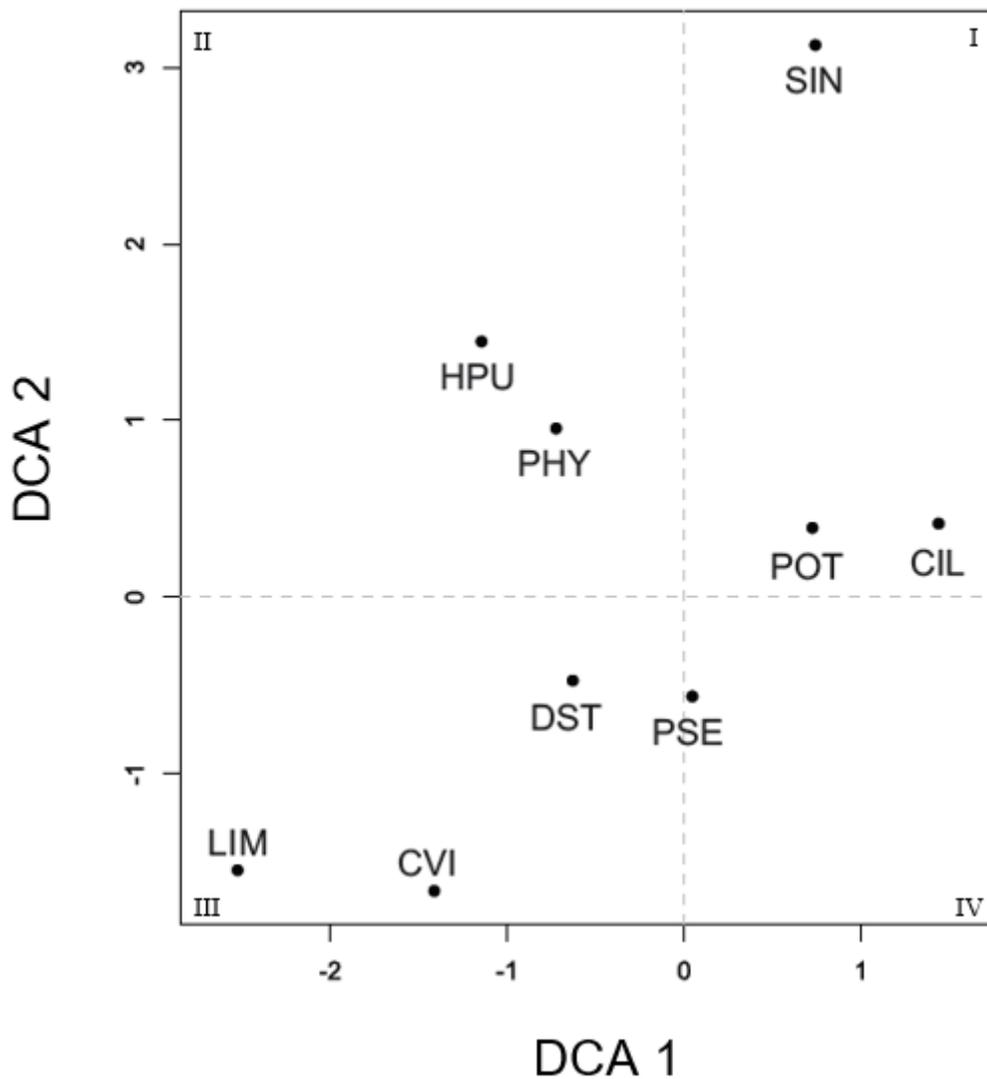


Figura 10. Ordenación de las especies del Lago T'zi BaNá en el plano definido por el eje 1 (temperatura) y el eje 2 (profundidad) del Análisis de Correspondencia sin Tendencia (DCA por sus siglas en inglés). Códigos de especies: PSE (*Pseudocandona annae*), CIL (*Cytheridella ilosvayi*), DST (*Darwinula stevensoni*), LIM (*Limnocythere* sp.), PHY (*Physocypris* sp.), HPU (*Heterocypris punctata*), POT (*Potamocypris* sp.), CVI (*Cypridopsis vidua*), SIN (*Strandesia intrepida*).

La Figura 11 muestra el DCA estratigráfico. Las líneas negra y roja son los puntajes dados en desviaciones estándar del Eje 1 y el Eje 2 del plano bidimensional. En el Eje 1, los números positivos indican mayor temperatura y los negativos menor temperatura, y en el Eje 2, los números positivos indican menor profundidad y los números negativos mayor profundidad, condiciones inferidas a partir del ordenamiento explicado en la descripción de la Figura 10. Estas representaciones estratigráficas están, de igual manera, divididas por zonas:

Zona I (~7,000-6,500 años cal AP): se muestra un aumento en la temperatura (Eje 1) y un nivel de profundidad del lago bajo (Eje 2), siendo la época en la que la temperatura tuvo su mayor incremento.

Zona II (~6,500-4,200 años cal AP): es una zona con un ambiente cambiante, sin embargo, se observa una tendencia al descenso en la temperatura y los niveles en la profundidad del lago. Aún con esta tendencia, se muestran dos períodos en los que la profundidad aumentó: 5,300 y 4,300 años cal AP.

Zona III (~4,200-3,450 años cal AP): la temperatura (Eje 1) muestra una tendencia al incremento, caso contrario el de la profundidad (Eje 2), la cual muestra la época menos profunda del lago.

Zona IV (3,450-2,500 años cal AP): la tendencia al descenso de la profundidad se mantiene, al igual que la de la temperatura al aumento, siendo inversamente proporcionales una de la otra.

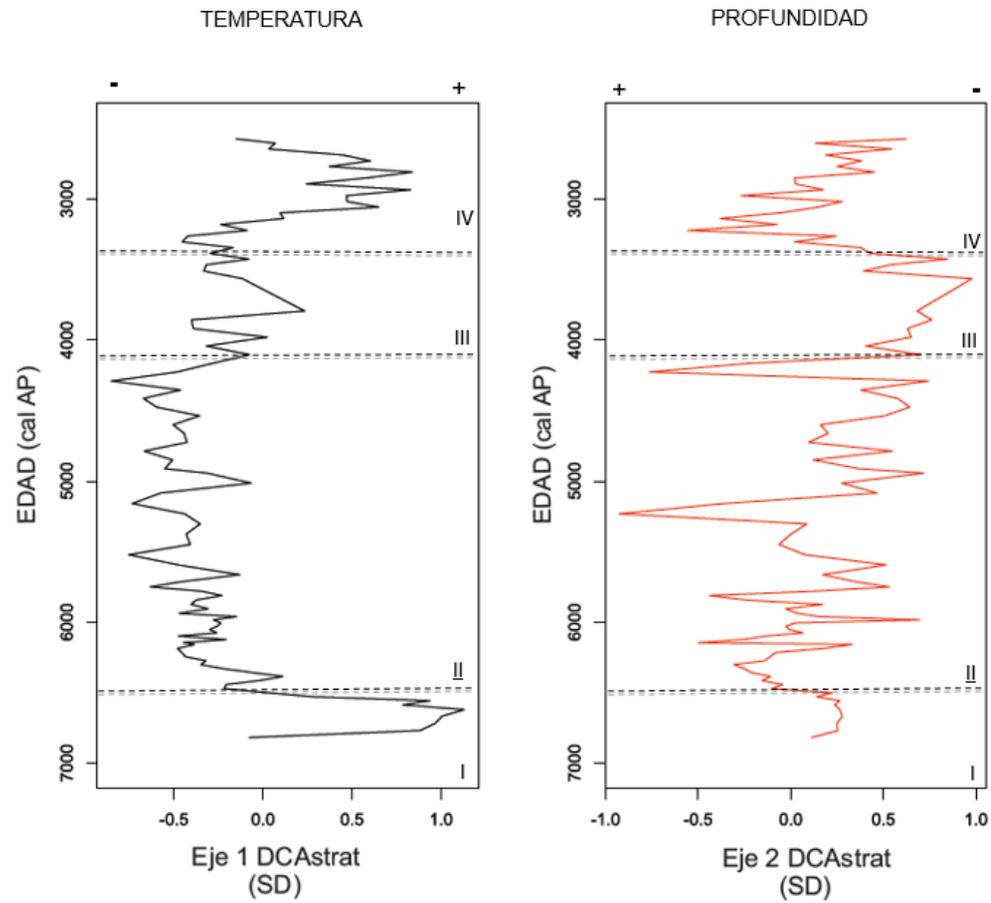


Figura 11. Representación estratigráfica de los ejes 1 y 2 del Análisis de Correspondencia sin Tendencia (DCA). Las líneas negra y roja muestran los valores en desviaciones estándar (eje Y) del eje 1 y 2 del plano bidimensional de la Figura 10 en años cal AP (calibrados antes del presente) (eje X).

En la Figura 12 presenta una combinación de la geoquímica analizada, la susceptibilidad magnética, las representaciones estratigráficas de los Ejes 1 y 2 del DCA y las especies que apoyaron su interpretación. El hecho de incluir cada uno de los indicadores en una figura, permite observar de mejor manera los resultados, robusteciéndose así la interpretación.

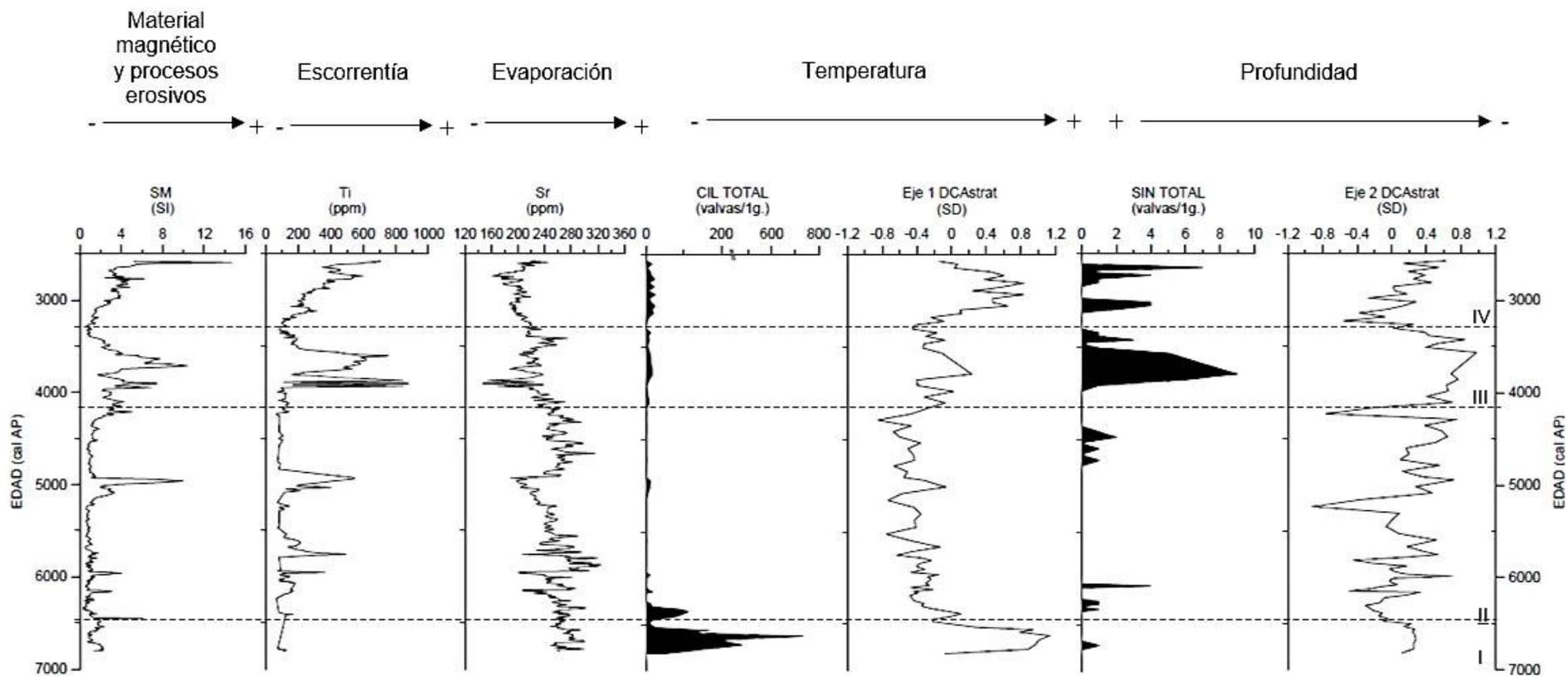


Figura 12. Diagrama incluyente: geoquímica y susceptibilidad magnética (SM), ensambles de las valvas adultas de ostrácodos encontradas en el núcleo del Lago T'zi BaNá, y representación estratigráfica de ambos ejes del Análisis de Correspondencia sin Tendencia (DCA). Códigos de especies: CIL (*Cytheridella ilosvayi*); SIN (*Strandesia intrepida*).

11. DISCUSIÓN

La reconstrucción paleoambiental del Lago T'zi BaNá contribuye con información relevante para las zonas de altitudes medias. En este estudio se utilizaron indicadores biológicos (ostrácodos) e indicadores no-biológicos (susceptibilidad magnética y geoquímica elemental), los que permitieron realizar inferencias con respecto a las condiciones del área a través de los últimos ~7,000 años AP.

11.1 Ostrácodos fósiles del Lago T'zi BaNá

La fauna fósil de la clase Ostracoda presentó 9 especies pertenecientes a 4 familias. De éstas se identificaron 4 especies bentónicas y 5 nectobentónicas. Siendo las más abundantes *Cytheridella ilosvayi*, *Pseudocandona annae*, *Darwinula stevensoni* y *Physocypria* sp. Las menos abundantes fueron *Limnocythere* sp., *Heterocypris punctata*, *Cypridopsis vidua*, *Strandesia intrepida* y *Potamocypris* sp.

Hasta la fecha el único trabajo que ha analizado el registro fósil de ostrácodos en la Selva Lacandona en tierras medias es el de Díaz *et al.* (2017) en el Lago Ocotitalito. En comparación con el presente estudio, los autores reportan un menor número de valvas (8,568 valvas/1 g.; en este proyecto se encontraron 15,111 valvas/1 g.) y menor número de especies identificadas (6 especies). A pesar que Díaz *et al.* (2017) estudiaron una temporalidad mayor (~10,000 años AP al presente), en el registro sedimentario del Lago T'zi BaNá se identificaron 3 especies más. Así la riqueza específica reportada en este estudio es similar a la reportada por Pérez *et al.* (2013), quienes estudiaron del Pleistoceno tardío hacia el Holoceno temprano en el Lago Petén Itzá, Guatemala. Esta diferencia en el número de especies encontradas en cada estudio pudo deberse a las resoluciones a las que se realizó cada análisis, es decir, cada cuantos centímetros se tomaron las muestras analizadas en cada estudio (cada 20 cm para el estudio de Pérez y cols., y cada 8 cm en el estudio de Díaz y cols.). Dado que el presente trabajo tiene una mayor resolución en el presente trabajo (cada 4 cm) hablando específicamente en la cantidad de años que fueron analizados, la probabilidad de encontrar un mayor

número de especies es más grande. Sin embargo, también podría deberse a las diferencias limnológicas específicas de cada lago.

Un aporte importante para el Lago T'zi BaNá fue la identificación de *Potamocypris* sp., la cual no había sido reportada para la región por Pérez *et al.* (2013). Esto probablemente se debe a que el registro sedimentario analizado en el presente trabajo abarca un período de tiempo de menores cambios durante el Holoceno medio y tardío, por lo que las condiciones ambientales eran las apropiadas para permitir que el establecimiento de esta especie fuera exitosa, con poca turbulencia (Holmes, 2002). Esta hipótesis es corroborada por la alta abundancia de valvas intactas que fueron encontradas en este trabajo.

En el caso de la identificación taxonómica de los ostrácodos fósiles, aunque el elemento más significativo y con gran valor diagnóstico es el caparazón bivalvo, la pérdida de las partes blandas del organismo a través del tiempo dificultan la identificación a un nivel específico (Baltanás, 2015), como en este estudio, además de las diferencias morfológicas que existen de juveniles a adultos, lo que puede causar problemas si no se observan a detalle las valvas. Un caso específico en este proyecto fue el de *Heterocypris punctata* y *Strandesia intrepida*, cuyos juveniles (A8) son casi idénticos. Sin embargo, al observar detalles en la ornamentación se lograron diferenciar estas especies.

Sin embargo, la información que se genera a partir de los organismos fósiles permite realizar inferencias ambientales también. Es el caso de *Limnocythere* sp. y *Physocypris* sp. las cuales se encontraron simultáneamente entre los ~6,500 y los ~6,000 años cal AP (Figura 8). La primera especie, se reportó como una especie bentónica y abundante en zonas litorales (Pérez, *et al.* 2013), mientras que la segunda, se considera nectobentónica y se distribuye en un amplio intervalo de profundidad (Pérez, *et al.* 2010c). Esto probablemente indica que estas especies pueden coexistir, dado que *Physocypris* sp. puede encontrarse en áreas con menor profundidad o más cercanas al litoral como lo observó Pérez (2010), a pesar que al encontrarse sola ha sido utilizada como especie indicadora de altas profundidades (>40 m).

11.2 Paleolimnología del Lago T'zi BaNá

Como se mencionó anteriormente, las especies de ostrácodos identificadas fueron diferenciadas como bentónicas y nectobentónicas, con el fin de poder describir los cambios en los niveles del lago. Según lo reportado por Holmes (2002), Echeverría (2016), y Pérez *et al.* (2013), los ostrácodos son buenos indicadores en las fluctuaciones de los niveles de los lagos, dado que la profundidad es un factor importante para el establecimiento de las comunidades de ostrácodos. Sin embargo, la temperatura es un factor esencial para el buen desarrollo, crecimiento y reproducción de los ostrácodos, pudiendo variar la intensidad de los efectos de la temperatura de especie a especie (Mesquita-Jones, *et al.* 2012). Este estudio, a diferencia de otros en los que se realizaron paleoreconstrucciones a partir de ostrácodos fósiles (Díaz, 2015; Pérez, *et al.* 2010c), utiliza un Análisis de Correspondencia sin Tendencia (DCA). El ordenamiento de las especies fue se basó en la abundancia de éstas, discriminadas valvas de organismos adultos o juveniles. A partir de sus abundancias y con base en el conocimiento previo de los hábitos ecológicos de las especies que permitieron elaborar una interpretación *a posteriori*, se asignaron los factores ambientales para cada eje del DCA, permitiendo realizar interpretaciones paleoecológicas e identificando patrones de distribución temporal y abundancia de las especies que reflejan un gradiente ambiental térmico del Lago T'zi BaNá a través del tiempo. (Correa-Metrio, *et al.* 2014; Baxter).

Con base en el ordenamiento de las especies (Figura 10) se infiere, a partir de las especies que se encontraban ordenadas en los extremos de los ejes, los parámetros ambientales dominantes de cada eje del DCA. Una exhaustiva búsqueda en la literatura permitió conocer las preferencias ecológicas de cada especie y así interpretar el significado paleoambiental de cada eje.

Entre las especies que aportan mayor información se encuentran *C. ilosvayi* para la temperatura (Eje 1) y *S. intrepida* para la profundidad (Eje 2) (Figura 12). El primer eje muestra una tendencia similar al titanio (Ti) y a la cantidad de material magnético que ingresó a la cuenca (susceptibilidad magnética (SM)). Las altas concentraciones del Ti y el aumento en la SM están asociadas a un aumento en la

escorrentía, por ende en la pluviosidad (Roy, *et al.* 2013), indicándose así un ambiente que se mantenía húmedo, con temperaturas cálidas. El segundo eje tiene una correlación positiva con el estroncio (Sr) (Figura 12). El incremento en la concentración de este elemento puede estar asociado a un aumento en la evaporación (Roy, *et al.* 2013), y al tener una relación con las abundancias de *S. intrepida*, se infiere que la profundidad del lago fue de baja a intermedia (~15-40 m).

Se identificó una tendencia proporcional entre la temperatura y el nivel del lago desde la base del registro sedimentario hasta lo más actual (Figura 12), constatando lo anteriormente expuesto.

11.3 Reconstrucción ambiental del Lago T'zi BaNá con base en los indicadores biológicos y no biológicos

Los sedimentos recuperados del Lago T'zi BaNá se caracterizaron principalmente por la presencia de limos y arcillas, con una pequeña banda de arenas (Figura 4). Los procesos tanto de sedimentación como resuspensión están ligados, lo que implica que dentro del lago existen condiciones de erosión, acumulación y transportación, condicionando así el tipo de sedimentos que se podrían encontrar (Håkanson, 2007). En este caso, el registro sedimentario presentó dominancia de sedimentos mezclados (limo-arcilla) y arcilla, lo cual permite inferir que los procesos que dominaron dentro del cuerpo de agua fueron de transportación y de erosión durante los ~5,600, ~5,000 y ~3,950 años cal AP, mismos que se observan en la actualidad. En estos años se registró un aumento en la precipitación y mayor escorrentía (Figura 6). Además, la cantidad de material magnético medido en la cuenca sugiere que estos procesos están involucrados con la erosión y la escorrentía, lo cual se observa en los valores más altos de la susceptibilidad magnética (SM) (Roy, *et al.* 2013), (Figura 5), corroborándose lo antes mencionado.

Las concentraciones de titanio (Ti), asociadas a la SM, permiten identificar períodos de mayor escorrentía por las altas concentraciones de Ti, cuya correlación con las concentraciones de estroncio (Sr) son negativas, mostrándose una tendencia inversamente proporcional a lo largo del núcleo entre el Ti y Sr. En los

períodos en el que los valores de Sr decrecen, es posible deducir que había una mayor disponibilidad de humedad en el ambiente, ya que el Sr aporta información sobre las variaciones de la evaporación e infiere períodos de sequía, según Roy, *et al.* (2013).

En cuanto a la correlación entre las concentraciones de Ti y SM, ésta se mantuvo positiva a lo largo del núcleo. Esto sugiere que el aporte de material magnético (SM) a la cuenca fue mediante transporte por aumento en la precipitación, de acuerdo con lo reportado por Roy *et al.* (2013). Lo anterior se relaciona con la presencia de sedimento fino (limo-arcilla), indicando que se fue depositando por escorrentía (Håkanson, 2007), pues se ha sugerido que las variaciones en la SM están relacionadas con cambios en los insumos litogénicos (acuosos, detríticos y eólicos) durante los ciclos transgresivos y regresivos, lo que a su vez produce cambios en la cantidad de hierro, arcilla y componentes ferromagnesianos (Plado, *et al.* 2016).

De este registro sedimentario se identificaron 4 zonas combinando todos los indicadores y los puntajes del DCA estratigráfico, de las cuales se presenta su interpretación a continuación:

En el período que comprende la **Zona I (~7,000-6,500 años cal AP)**, se observó que la profundidad del lago era intermedia, con temperaturas cálidas. Esto se sugiere por la abundancia de *Cytheridella ilosvayi*. La especie ha sido reportada como bentónica por Pérez *et al.* (2013), y es considerada una especie con afinidad a aguas intermedias (15-40 m). Se ha reportado que su gran abundancia está asociada a zonas con temperaturas cálidas >20°C (Pérez, *et al.* 2010a). En este período existieron procesos de evaporación que fueron deducidos a partir de las concentraciones intermedias de Sr, valores que se correlacionan de manera positiva con las altas temperaturas sugeridas por los puntajes más altos dados en el ordenamiento de las especies en la representación estratigráfica del Eje 1 del DCA, infiriéndose que predominaron profundidades bajas (~15 m) (Figura 12).

En la **Zona II (~6,500-4,200 años cal AP)** se identificó una gran variabilidad, entre aumentos y descensos en la temperatura, y en los niveles del lago. Durante este período, la temperatura fluctúa con una ligera tendencia a la disminución, y es

en esta zona en la que se infieren los niveles del lago más altos de todo el registro. Durante los años comprendidos en esta zona, se muestran pequeños periodos con temperaturas templadas: 5,500, 5,300 y 4,300 años cal AP, mostrándose en el Eje 1 del DCA estratigráfico (Figura 12). Dicha condición está dada por las dos especies más abundantes en la zona: *Darwinula stevensoni* y *Pseudocandona annae*, especies reportadas con afinidad a temperaturas templadas (<20°C) (Figura 8) (Echeverría, 2016; Higuti, *et al.* 2009).

Aunque la profundidad tiene una tendencia al descenso hacia el presente, existen cuatro periodos en los que los niveles del lago mantuvieron una profundidad de intermedias a máximas: 6,200, 5,700 cal AP, y es a los 5,300 y a los 4,200 años cal AP, periodos mostrados en el Eje 2 del DCA estratigráfico (Figura 12). Esta condición está sugerida por las altas abundancias de *Physocypria* sp., asociada a profundidades más altas (40-50 m), y las bajas abundancias de *Strandesia intrepida*, especie asociada a profundidades de intermedias a bajas (<15 m) (Figura 8) (Pérez, *et al.* 2010a). La posible razón por la cual los niveles del lago son altos en esta zona, es el incremento en la pluviosidad inferido por el incremento en los procesos erosivos y en la escorrentía, situación que es inversa a lo que ocurre con la evaporación, la cual baja (Figura 12).

En la **Zona III (~4,200-3,450 años cal AP)** se considera como un período en el que la temperatura tiende a aumentar y la profundidad del lago a disminuir. La presencia de *Cytheridella ilosvayi* a la par del Eje 1 del DCA infiere este ligero incremento de la temperatura en dos periodos: a los 4,100 y 3,800 años cal AP. En los mismos periodos las concentraciones de Sr fueron altas (Figura 12). La profundidad, en cambio, se mantuvo en un nivel bajo en los mismos periodos, situación que concuerda con la alta abundancia de *S. intrepida* y la alta en los procesos de evaporación, confirmándose lo mencionado anteriormente. Existen dos periodos en los que el Ti y la SM tienen un incremento considerable: 3,900 y 3,600 años cal AP. Sin embargo, estos no afectaron considerablemente a los niveles del lago, los cuales se mantuvieron bajos, posiblemente por la condición kárstica del lago, la cual podría haber permitido la percolación del agua del lago durante estas posibles épocas de lluvia, imposibilitando el aumento en los niveles de profundidad.

Durante el período comprendido en la **Zona IV (3,450-2,500 años cal AP)** se muestra que las altas abundancias de *C. ilosvayi* infiere un ambiente cálido y la de *S. intrepida* una disminución en los niveles de profundidad del lago (Pérez, *et al.* 2010a) (Figura 12). Además, la disminución en las concentraciones de Ti y el ligero aumento en las concentraciones de Sr sugieren el aumento en la evaporación (Roy, *et al.* 2013), relacionado, de igual manera, con el descenso en la profundidad del lago inferida a partir de los altos puntajes del Eje 2 del DCA. De esta manera, se infiere que las condiciones ambientales eran cálidas-secas, y hacia el final del registro cambian las condiciones ambientales, donde se da un aumento de Ti y SM, mismo que no concuerda con la baja en la profundidad del lago. Esto último puede estar relacionado con que el Lago T'zi BaNá es un lago que presenta cambios drásticos en su nivel del agua (observaciones actuales en campo), lo que está relacionado con los períodos de secas y lluvias. Por lo que la resolución del presente estudio tal vez aún no es lo demasiado alta como para estudiar a tan detalle estos cambios anuales, sino más bien tendencias generales en cambios de temperatura y niveles del lago.

Adicionalmente a los conteos de las especies y a la geoquímica, se registraron los conteos de las valvas de organismos adultos y juveniles para identificar si las condiciones ambientales afectaban de alguna manera el crecimiento y desarrollo de las especies de ostrácodos. Existen diversos factores que afectan al desarrollo de algunas especies de ostrácodos como la temperatura, la conductividad, la salinidad, oxígeno, entre otros (Holmes, 2002; Pérez, *et al.* 2011; Covagia, 2015; Mesquita-Joanes, 2012). En cada zona identificada, la abundancia de juveniles fue notable y mayor al número de valvas adultas y en ningún punto del registro sedimentario la abundancia absoluta de adultos rebasó las 30 valvas/1 g. Lo anterior sugiere que la reconstrucción paleoambiental es confiable, ya que cada adulto deja 8 caparazones juveniles en el sedimento, indicando que las especies encontradas no se vieron afectadas en cuanto a su desarrollo. Sin embargo se reportó un mayor número de juveniles que de adultos, lo cual puede ser explicado por un transporte por energía alta proveniente de otro sitio según Whatley (1988).

11.4 El registro del Lago T'zi BaNá en el contexto local y regional

El enfoque de este estudio era principalmente un análisis paleoecológico para la reconstrucción ambiental del lago. Sin embargo, los resultados mostraron que el registro sedimentario de este lago posee potencial para realizar inferencias climáticas a nivel local y regional. A continuación se presenta esta primera aproximación.

En el Lago T'zi BaNá se identificaron las variaciones climáticas más notorias ocurridas a partir del Holoceno medio (desde la base de la secuencia sedimentaria hasta los ~3,000 años cal AP) hasta mediados del Holoceno tardío (de los ~3,000 a los ~2,500 años cal AP).

Gracias a los resultados obtenidos a partir de los indicadores biológicos y no-biológicos, se observó un período de cálido de poca humedad entre los ~7,000 y los ~6,000 años cal AP. Este período concuerda con el Óptimo Climático del Holoceno (OCH), período en el cual la temperatura incrementó (Walter Anthony, *et al.* 2014), concluyéndose que fue un período de poca pluviosidad en la región de T'zi BaNá. Esta condición se correlaciona de manera negativa con lo observado en el Lago Ocotitalito, por Díaz *et al.* (2017), quienes reportaron que esta época contaba con condiciones relativamente húmedas. Esta diferencia en dos registros muy cercanos podría deberse a características propias de cada lago (T'zi BaNá muy profundo y extenso, y Ocotitalito intermedio con mayor extensión) o bien a la diferencia de altitud (diferencia de 380 m).

De los ~6,000 hasta los ~4,000 años, se presentan intervalos de sequía, alternando con períodos de mayor disponibilidad de humedad. Las épocas con menos humedad y más cálidas, se centran en ~6,000, ~5,500 y ~4,500 años AP (Figura 12). Esto es contrario a lo reportado por Leyden *et al.* (1998) en el registro sedimentario de tierras bajas Cobá, Península de Yucatán, donde se reporta como un período cálido-húmedo, correlacionándose con lo visto en Ocotitalito por Díaz *et al.* (2017). Sin embargo, en San José Chulchacá, también Yucatán, Leyden, *et al.*

(1996) la reportaron como una época más seca, correlacionándose de manera positiva con lo observado en este estudio. Este período va de acuerdo a las condiciones ambientales a nivel global analizadas por Wanner *et al.* (2008), donde se especifica que alrededor de los 6,400 años cal AP había una mayor disponibilidad de humedad al norte de los Neotrópicos, panorama que va de la mano con el OCH.

De los ~4,000 a los ~3,000 años cal AP, se observaron 3 picos en los que se dio un aumento en la pluviosidad considerablemente (3,800; 3,550 y 3,300 años AP), deducido a partir del incremento en las concentraciones de Ti y en la cantidad de material magnético que ingresó a la cuenca (SM), además existió un ligero aumento en la temperatura inferido a partir del ordenamiento de las especies (Figura 12), datos que concuerdan con lo observado por Vázquez *et al.* (2016), pues es en esta época en la que observaron una temporada seca con 3 períodos húmedos (3,750; 3,550 y 3,350 años AP) en el Lago Lacandón, el cual está situado en la misma región que el Lago T'zi BaNá, en la Selva Lacandona. Así mismo, en el reporte de Curtis *et al.* (1998), de un estudio realizado en el lago Petén Itzá (tierras bajas de Guatemala) durante mismo período, identificaron una época en la que la erosión de las zonas aledañas a la cuenca se incrementó, al igual que la precipitación y la escorrentía, como se plantea para el Lago T'zi BaNá. De esta manera, aunque podría existir una diferencia en las condiciones climáticas presente en el Lago Lacandón y el Lago T'zi BaNá que podría asociarse con la diferencia de tamaño entre ambos lagos, ya que se ha reportado que en lagos más pequeños y casi cerrados, como es el Lago Lacandón, los procesos de evaporación son más altos (Rozanski & Gonfiantini, 1990; Curtis, *et al.* 1998), ambos comparten la misma condición climática.

A lo largo del registro sedimentario, preliminarmente se han podido identificar de 3 de los 8 ciclos de Bond: uno a los ~5,700 años cal AP, otro a los ~4,300 años cal AP y a un tercero a los ~3,000 años cal AP (Bond, *et al.* 2001). Estos ciclos son eventos fríos que ocurrieron cada ~1,500 años durante el Holoceno, basados en estudios de granos teñidos con hematita acarreados por el deshielo hacia el Atlántico Norte (Bond, *et al.* 2001; Mayewski, *et al.* 2004). Estos ciclos son

momentos fríos en los cuales existieron descargas de hielo en las aguas del Atlántico, los cuales causan una disminución en la Temperatura Superficial del Atlántico Norte (TSAN), causando un desplazamiento en la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) hacia el sur, asociado a la ralentización de la corriente superficial del Atlántico, generando en teoría periodos de sequía al norte de los Neotrópicos (Franco-Gaviria, 2014; Haug, *et al.* 2001). Por estas razones, durante esta época se plantean períodos de menor disponibilidad de humedad, mismos que se correlacionan con los puntos en los que la temperatura tuvo un ligero aumento en el Lago T'zi BaNá, condición que se corrobora con la disminución de los niveles del lago observados en el Eje 2 del DCA (Figura 11).

Desde los ~3,500 hacia los ~2,550 años cal AP se identificó una época cálida con una tendencia en el incremento en la temperatura, considerándose un periodo en el que existió una menor disponibilidad de humedad, lo que concuerda con lo que observaron Vázquez *et al.* (2016), que a su vez coincide con lo reportado en el Caribe por Hodell *et al.* (1991), en el cual se menciona, también, que en todo este período existieron condiciones de sequía. Tanto el trabajo de Hodell, *et al.* (1991) como el presente proyecto, se relacionan de manera negativa con lo registrado por Haug *et al.* (2001) en el Cariaco, Venezuela, donde se observó este como un período de gran variabilidad con valores altos de precipitación hacia el presente. Estas dos últimas épocas, que abarcan parte del Holoceno tardío, han sido reportados con una disminución en la insolación (Bianchi, 1999), lo que probablemente indica que el aumento de la temperatura fue a nivel local.

12. CONCLUSIONES

La evolución ambiental del Lago T'zi BaNá estuvo caracterizada principalmente por las fluctuaciones en la temperatura del lago durante el Holoceno medio (~7,000 a ~4,000 años cal AP) y parte del Holoceno tardío (~4,000 a ~2,500 años cal AP), comprobándose que los ostrácodos en esta zona no únicamente responden a los cambios en los niveles del lago, como se planteó originalmente, sino también a las variaciones en la temperatura.

Las condiciones ambientales entre los ~7,000 a los ~6,500 años cal AP fueron de poca humedad con aumento en la temperatura; alrededor de los 6,500 y los 4,200 años cal AP fue una época con fluctuaciones ambientales, predominando un ambiente templado y húmedo; el período que comprende entre los ~4,200 y los ~3,450 años cal AP fue considerado como un período de baja pluviosidad, por ende, de baja escorrentía, y de altas temperaturas, considerándose una época cálida-seca; y finalmente, entre los ~3,450 y los ~2,500 años cal AP, se identificó un aumento en la temperatura, y por ende, un nivel del lago bajo.

El análisis geoquímico del registro sedimentario permitió tener una visión ambiental con respecto a los procesos de precipitación/escorrentía y evaporación ocurridos en el lago, por los cuales se determinaron los períodos en los que la lluvia pudo incrementar dado los altos niveles de Ti y la gran cantidad de material magnetizado que ingresó a la cuenca (SM), y épocas en las cuales la evaporación aumentó dado por el incremento de los niveles de Sr.

Con respecto a las abundancias de especies, las más abundantes a lo largo del registro sedimentario fueron *Darwinula stevensoni* y *Physocypria* sp., mismas que indicaron que los niveles del lago se mantenían en una profundidad de entre los ~15 – 40 m. Esta condición se confirmó principalmente por la relación negativa que estas especies tienen con la abundancia de *Strandesia intrepida*. Se infiere, de esta manera, que el lago durante el Holoceno medio y tardío no llegó a su profundidad máxima reportada en la actualidad (51 m en la parte más profunda).

Sin embargo, es en el ordenamiento de las especies en el Análisis de Correspondencia sin Tendencia (DCA) en el que se deduce que la temperatura es el factor que influye, en mayor medida, en las especies de ostrácodos en el Lago T'zi BaNá, y gracias a este ordenamiento, en el cual se presentan a *Cytheridella ilosvayi*, *Potamocypris* sp. y a *Strandesia intrepida* en un mismo cuadrante, se puede deducir que la temperatura se mantuvo mayor a los 20°C. Sin embargo, no es posible decir que este promedio fue el mismo para todo el registro sedimentario, pues en algunas zonas las especies más abundantes eran de climas más fríos (*Pseudocandona annae*, *Physocypris* sp. y *Darwinula stevensoni*), menores a los 20°C.

Finalmente, se aportó un panorama climático para regiones de altitud media, panorama que apoya la teoría en torno a las épocas de sequías causadas por los ciclos de Bond y que está asociado a un desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) hacia el sur. De esta manera, se sugiere que, para confirmar estas inferencias climáticas a partir de las condiciones del Lago T'zi BaNá, el cual ha mostrado un gran potencial como registro climático, se amplíen los análisis de indicadores no-biológicos, además de la obtención de núcleos cortos para poder realizar un estudio complementario del Holoceno tardío que pueda robustecer este estudio, así como incorporar a la reconstrucción climática y la información paleoecológica generada de la región otros registros a diferentes altitudes y latitudes.

13. AGRADECIMIENTOS ACADÉMICOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, que ha sido mi segundo hogar, mi alma máter.

A la Facultad de Ciencias, mi casa de estudios por 5 años, que me dio la formación académica necesaria para salir adelante, permitiéndome formar parte de clases de alto nivel, conociendo personas sobresalientes en la investigación científica.

A la Dra. Liseth Pérez Alvarado, que me brindó todo su apoyo. Por su confianza, por su amistad y sobre todo, por su paciencia; por sus consejos, por transmitirme todo su conocimiento sobre el tema y por dirigir esta tesis con el mejor de los ánimos y la mejor de las disposiciones.

A la Dra. Margarita Caballero y a la M. en C. Itzel Sigala, por sus observaciones y críticas constructivas que me ayudaron a lo largo de la realización de este estudio.

Al Dr. Alexander Correa y al M. en C. Juan Felipe Franco Gaviria, por compartir las muestras del núcleo extraído, así como por apoyarme con los estudios geoquímicos y estadísticos.

Al Dr. Frank Raúl Gio y al Dr. Javier Alcocer por aceptar el formar parte de mi jurado, aportando todo su conocimiento para apoyar esta tesis.

A la Dra. Bárbara Moguel por sus correcciones y sugerencias que enriquecieron este trabajo escrito.

A la M. en C. Berenit Mendoza Garfias, por facilitar la obtención de fotografías de microscopía electrónica de barrido en el Instituto de Biología de la UNAM.

A Miguel García Cruz, y resto de personal de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) y a la Reserva de Nahá en el Municipio de Ocosingo, Chiapas, por apoyar en el trabajo de campo para obtener las muestras utilizadas en esta tesis. Por su hospitalidad durante nuestra estancia.

Y gracias a los proyectos PAPIIT IA101515 “Nuevas técnicas paleoambientales a partir del análisis combinado de quironómidos, ostrácodos e isótopos estables en la selva Lacandona, Chiapas, México” (proyecto tutor principal) y SEP-CONACYT 252148 “Impacto humano en lagos de media altura de la selva lacandona, norte de los Neotrópicos” (proyecto tutor principal y otorgó beca a la tesista) y PAPIIT IA100714 “Historia de la vegetación y el clima en la selva lacandona, Chiapas, durante los últimos 10,000 años” (colaboración), por el apoyo económico brindado para la concretar la realización de este proyecto.

14. AGRADECIMIENTOS PERSONALES

Agradezco principalmente a mi madre por todas las veces que me acompañó en mis desvelos en el proceso de realización de esta tesis y a lo largo de toda la carrera. Y pues porque fue ella mi todo.

A mi tío Martín por todas esas veces que se levantó de madrugada junto conmigo para llevarme a la facultad porque tenía una práctica de campo o una clase muy temprano. Y a mi familia entera por todo el apoyo brindado.

A todos mis amigos iniciando por el #TeamLis, que siempre estuvo para mí, dándome su amistad y ayudándome a mejorar esta tesis. Por tantos momentos de diversión y bullying fraterno. Continuando con los NUF's, porque ustedes mataron mis tiempos muertos en la carrera con risas y estupideces; a la Comunidad del anillo, porque siempre me soportaron en mis momentos de estrés y me alimentaban siempre; mis amigos físicos que simplemente distraían mi mente del estrés y de las cosas que no podía aguantar en cierto momento. Y a todos los bobos que me ayudaron directa o indirectamente. A todos ustedes, los amo.

A cada uno de los excelentes profesores con los que me tope en la carrera, que me dieron todo su conocimiento, y que además se convirtieron en un amigo más.

15. REFERENCIAS

- Ahmad, S. (2010). Detrend Correspondence Analysis of vegetation along motorway *Pak. J. Bot.*, 42, 2473-2477.
- Alcaraz, J. F. (2013). *Ordenación y clasificación*. Universidad de Murcia. España.
- Bianchi, G.G., McCave, I.N. (1999). Holocene periodicity in North Atlantic climate and deep-ocean flow south of Iceland. *Nature* 397, 515-517.
- Bond, G., Kromer, B., Beer, J., Muscheler, R., Evans, M., Showers, W., Hoffman, S., Lotti-Bond, R., Hajdas, I., Bonani, G. (2001). Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science*, 294, 2130-2135.
- Brusca, R., Brusca, G., Haver, N. (2005). *Invertebrates*. España.
- Blaauw, M. & Christen, J. A. (2011). *Manual Bacon*.
- Baltanás, A., Mesquita-Joanes, F., (2015). Clase Ostracoda: Orden Podocopida. *Ibero Diversidad Entomológica*, 74, 1-10.
- Baxter, J. Ordination Retrieved 10/03/16, from www.csus.edu/indiv/b/baxterj/bio%20221b/ordination.pdf
- Bush, M., Correa-Metrio, A., McMichael, C., Sully, S., Shadik, C., Valencia, B., Guilderson, T., Steinitz-Kannan, M., Overpeck, J. (2016). A 6900-year history of landscape modification by humans in lowland Amazonia. *Quaternary Science Reviews*, 141, 52-64.
- Curtis, J. H., Brenner, M., Hodell, D. A., Balsler, R. A., Islebe, G. A. & Hooghiemstra, H. (1998). A multiproxy study of Holocene environmental change in the Maya Lowlands of Peten, Guatemala. *Journal of Paleolimnology*, 19, 139-159.
- Curry, B (1999). An environmental tolerance index for ostracodes as indicators of physical and chemical factors in aquatic habitats. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 148, 51-63.
- Cohen, A. . (2003a). The Biological Environment of Lakes Paleolimnology: The History and Evolution of Lake Systems (pp. 96-126). U.S.A.
- Cohen, A. . (2003b). The Physical Environment of Lakes Paleolimnology: The History and Evolution of Lake Systems (pp. 56-68). U.S.A.
- Cohuo, S., Macario-González, L., Pérez, L. & Schwalb, A. (2016). Overview of Neotropical-Caribbean freshwater ostracode fauna (Crustacea, Ostracoda): identifying areas of endemism and assessing biogeographical affinities. *Hydrobiologia*. ONLINE: DOI 10.1007/s10750-016-2747-1
- Colinvaux, P., De Oliveira, P. E. & Moreno, J. E.. (1999). *Amazon Pollen Manual and Atlas*. Amsterdam Hardwood Academic Publishers.
- CONANP. (2006). *Programa de conservación y manejo: Área de Protección de Flora y Fauna Metzabok*. México: CONANP-SEMARNAT.
- Chávez-Lara, C. M. (2011). *Paleoecología de Ostrácodos en los últimos 45 cl ka A.P., procedentes de los sedimentos del paleolago Babícora, desierto de Chihuahua, México*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Caballero, M., Valdez, F., Rodríguez, A. (2013). Paleolimnología: como descifrar la historia de los lagos y su entorno a partir del estudio de sus sedimentos. *Paleontología mexicana* 3, 22-28.

- Correa-Metrio, A., Dechnik, Y., Lozano-García, S., Caballero, M. (2014). Detrended correspondence analysis: A useful tool to quantify ecological changes from fossil data sets. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66, 135-143.
- Covagia, C., Cusminsky, G., Baccalá, N., Pérez, P. (2015). Dynamics of ostracod populations from shallow lakes of Patagonia: life history insights. *Journal of Natural History*, 49(17-18), 1023-1045.
- Dole-Oliver, M. J., Galssi, D.M., Marmonier, P., Chetalliers, M. C. (2000). The biology and ecology of lotic microcrustaceans *Freshwater Biology*, 44, 63-91.
- Díaz, K. A. . (2015). *Historia ambiental durante el Holoceno en la Selva Lacandona inferida a partir de ostrácodos en sedimentos del Lago Ocotolito, Chiapas, México*. (Licenciatura), Universidad Nacional Autónoma de México México
- Díaz, K. A., Pérez, L., Correa-Metrios, A., Franco-Gaviria, J. F., Echeverría, P., Curtis, J., Brenner, M. (2017). Holocene environmental history of tropical, mid-altitude Lake Ocotolito, México, inferred from ostracodes and non-biological indicators. *The Holocene* 1-10.
- Echeverría, P. (2016). *Ostrácodos (Crustacea: Ostracoda) en lagos kársticos (Montebello, Selva Lacandona y El Petén) en el norte de los Neotrópicos en relación a un gradiente altitudinal: diversidad, distribución y ecología*. (Licenciatura), Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Franco-Gaviria, F. J. . (2014). *Dinámicas de la vegetación y el clima del Holoceno en la Selva Lacandona, Estado de Chiapas, México*. (Maestría), Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Fritz, S., Metcalfe, S., Dean, W. (2001). Holocene climate patterns in the Americas inferred from paleolimnological records. In V. Markgraf (Ed.), *Interhemispheric climate linkages* (1 ed., pp. 241-263). U.S.A.
- Hill, M., Gauch, H. Jr. (1980). Detrended Correspondence Analysis: An Improved Ordination Technique *Vegetatio*, 42, 42-47.
- Hodell, D. A., Curtis, J. H., Jones, G. A., Higuera-Gundy, A., Brenner, M., Binford, M. W. & Dorsey, K. T. . (1991). Reconstruction of Caribbean climate change over the past 10 500 years. *Nature*, 352, 790-793.
- Hodell, D. A., Curtis, J. H. & Brenner, M. (1995). Possible role of climate in the collapse of Classic Maya civilization. *Nature* 375 (6530), 391-394.
- Haug, G. H., Haughen, K. A., Sigman, D. M., Peterson, L. C., Rohl, U. . (2001). Southward migration of the Intertropical Convergence Zone through the Holocene. *Science* 293, 1304-1308.
- Holmes, J. (2002). Zoological Indicators. In J. Smol, Birks, H., Last, W. (Ed.), *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Håkanson, L. . (2007). Lake environments. In C. y. T. Perry, K. (Ed.), *Environmental sedimentology* (pp. 425). Australia.
- Higuti, J., Lansac-Tôha, F. A., Velho, L. F., Pinto, R. L., Vieira, L. C. & Martens, K. (2009). Composition and distribution of Darwinulidae (Crustacea, Ostracoda) in the alluvial valley of the upper Paraná River, Brazil. *Braz. J. Biol.* 69, 253-262.

- Hodell, D. A., Turchyn, A. V., Wiseman, C. J., Escobar, J., Curtis, J., Brenner, M., Brown, E.T. (2012). Late Glacial temperature and precipitation changes in the lowland Neotropics by tandem measurement of $\delta^{18}\text{O}$ in biogenic carbonate and gypsum hydration water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 27, 1152-1165.
- Ilijanić, N., Slobodan, M., Ozren, H., Koraljka, B. (2016). *A sedimentary record of Late Pleistocene and Holocene environmental changes from lakes on the Eastern Adriatic coast*. Paper presented at the Regional Committee on Mediterranean Neogene Stratigraphy & Croatian Geological Society, Croatia.
- Juárez, B. (2005). *Registro de cambios ambientales en sedimentos del lago "La Preciosa", Pue., con base en el estudio de ostrácodos*. (Maestría), Universidad Nacional Autónoma de México México
- Karanovic, I. (2012). *Recent Freshwater Ostracods of the World: Crustacea, Ostracoda, Podocopida* (Springer Ed.). Alemania
- Keyser, D. (1977). Ecology and Zoogeography of recent brackish-water Ostracoda (Crustacea) from South-West Florida. In H. D. Löffler, D. (Ed.), *Aspects of Ecology and Zoogeography of recent and fossil Ostracoda* Salzburgo: Dr. W. Junk b.v. Publishers, The Hague
- Lavenu, A., Bonhomme, M.G., Vatin-Perigon, N., Depoitere, P. . *Journal of South American Earth Sciences*, 2 (1) : 35-47. (1989). Neogene magmatism in the Bolivian Andes between 16°S and 18°S : Stratigraphy and K/Ar geochronology. *Journal of South American Earth Sciences*, 2(1), 35-47.
- Legendre, P. & Legendre, L. (1998). *Numerical ecology* (2da ed.). Amsterdam Elviesier Science
- Leyden, B., Brenner, M., Whitmore, T., Curtis, J., Piperno, D., Dahlin, B. (1996). A record of long- and short-term climatic variation from northwest Yucatan: Cenote San José Chulchacá. In S. Fedick (Ed.), *The Managed Mosaic: Ancient Maya Agriculture and Resource Use* (pp. 30-50). U.S.A.
- Leyden, B., Brenner, M., Dahlin, B. H. (1998). Cultural and climatic history of Cobá, a lowland Maya city in Quintana Roo, Mexico. *Quaternary Research*, 49, 111-122.
- Lepš, J. & Šmilauer, P. (2003). *Multivariate analysis of ecological data using CANOCO*. Cambridge, England: Cambridge University.
- Lozano-García, M. S., Ortega, B., Caballero, M. & Urrutia Fucugauchi, J.. (1993). Late Pleistocene and Holocene Paleoenvironments of Chalco Lake, Central Mexico. *Quaternary Research* 40 (3), 332-342.
- Mezquita, F., Tapia, G. & Roca, J. R. (1999). Ostracoda from springs on the eastern Iberian Peninsula: ecology, biogeography and palaeolimnological implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 148, 65-85.
- Meisch, C. (2000). *Crustacea: Ostracoda* (S. v. Miltclcuropa Ed.). Berlín.
- Mayewski, P., Rohling, E., Stager, C., Karlén, W., Maasch, K., Meeker, L., Mayerson, E., Gasse, F., van Kreveld, S., Holmgren, K., Lee-Thorp, J., Rosqvist, G., Rack, F., Staubwasser, M., Schneide, R., Steig, E. (2004). Holocene climate variability. *Quaternary Research*, 62, 243-255.

- Mesquita-Jones, F., Smith, A. J. & Viehberg, F. A. (2012). The Ecology of Ostracoda Across Levels of Biological Organisation from Individual to Ecosystem: A Review of Recent Developments and Future Potential. *Developments in Quaternary Science*, 17, 15-35.
- Mesquita-Jones, F., Smith, A. J. & Viehberg, F. A. (2012). Ecology of individuals. In D. J. Horne, Holmes, J., Rodriguez-Lazaro, J. & Viehberg, F. A. (Ed.), *Ostracoda as proxies for Quaternary Climatic Change*. Amsterdam Elsevier
- Pienitz, R. & Lotter, A. F. (2009). Advances in Paleolimnology. *PAGES news*, 17 (3), 92-93.
- Pinilla, A. G. A. (1998). *Indicadores biológicos en ecosistemas acuáticos continentales de Colombia* (F. U. d. Bogotá Ed.). Colombia: Centro de Investigaciones Científicas
- Pérez, L. . (2010). *Non-marine ostracodes from the Yucatán Peninsula as late Quaternary paleoenvironmental indicators*. (Doctorado), Technische Universität Braunschweig, Alemania.
- Pérez, L., Lorenschat, J., Bugja, R., Brenner, M., Scharf, B., Scwalb, A. (2010a). Distribution, diversity and ecology of modern freshwater ostracodes (Crustacea), and hydrochemical characteristics of Lago Petén Itzá, Guatemala. *Journal of Limnology*, 69, 146-159.
- Pérez, L., Lorenschat, J., Brenner, M., Scharf, B., Scwalb, A. (2010b). Extant freshwater ostracodes (Crustacea: Ostracoda) from Lago Petén Itzá, Guatemala. *Rev. Biol. Trop.*, 58, 871-895.
- Pérez, L., Bugja, R., Massaferró, J., Steeb, P., van Geldern, R., Frenzel, P., Brenner, M., Scharf & Schwalb, A. . (2010c). Post-Columbian environmental history of Lago Petén Itzá, Guatemala *Rev. Mex. Cienc. Geol.* , 27, 490-507.
- Pérez, L., Frenzel, P., Brenner, M., Escobar, J., Hoelzmann, P., Scharf, B., Scwalb, A. (2011). Late Quaternary (24–10 ka BP) environmental history of the Neotropical lowlands inferred from ostracodes in sediments of Lago Petén Itzá, Guatemala. *Journal of Paleolimnology*, 46, 59-74.
- Pérez, L., Lorenschat, J., Brenner, M., Scharf, B., Schwalb, A. . (2012). Non-marine ostracodes (Crustacea) of Guatemala. *Biodiversidad*, 2, 121-131.
- Pérez, L., Lorenschat, J., Massaferró, J., Pailles, C., Sylvestre, F., Hollwedel, W., Brandorff, G., Brenner, M., Islebe, G., Lozano, M. S., Scharf, B & Schwalb, A. . (2013). Bioindicators of climate and trophic state in lowland and highland aquatic ecosystems of the Northern Neotropics. *Biol. Trop.* , 2, 603-644.
- Petrequin, P., Arnaud, C., Carot, P., Fauvet-Bertelot, M. F., Lamy, R., Magny, M., Metcalfe, S. E., Polaco, O. J., Richard, H., Rios, M. M. & Xelhuanzi, M. S. (1994). 8,000 años de la Cuenca de Zacapu: Evolución de los paisajes y primeros desmontes. *Cuadernos de Estudios Michoacanos* 6, 1-144.
- Plado, J., Ainsaar, L., Dmitrijeva, M., Põldsaar, K., Ots, S., Pesonen, L., Preeden, U. (2016). Magnetic susceptibility of Middle Ordovician sedimentary rocks, Pakri Peninsula, NW Estonia. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 65, 125-137.
- R Core Team (2013). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria
URL <http://www.R-project.org/>.

- Rivas, G. & Hoffmann, A. (2012). Phylum Arthropoda In M. A. R. Fernández, G. (Ed.), *Niveles de organización* (pp. 413). México
- Roca, J. R. & Danielopol, D. L. (1991). Exploration of interstitial habitats by the phytophilous Ostracod *Cypridopsis vidua* (O.F. Millier) : experimental evidence. *Limnology Journal* 27, 243-252.
- Roca, J. R., Baltanás, A. & Uiblein, F. . (1993). Adaptive responses in *Cypridopsis vidua* (Crustacea: Ostracoda) to food and shelter offered by a macrophyte (*Chara fragilis*). *Hydrobiologia*, 262, 127-131.
- Rodríguez, F. E. . (2011). *Estudio morfológico de ostrácodos dulceacuícolas de Durango y Veracruz, México* (Licenciatura), Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Roy, P.D., Smykatz-Kloss, W., Dinha, R. . (2006). Late Holocene geochemical history inferred from Sambahr and Didwana playa sediments, Thar Desert: comparison and synthesis. *Quaternary International* 144(1), 84-98.
- Roy, P. D., Rivero-Navarrete, A., López-Balbiaux, N., Pérez-Cruz, L. L., Metcalfe, S. E., Sankar, G. S., S´ncez-Zavala, J. L. (2013). A record of Holocene summer-season paleohydrological changes from the southern margin of Chihuhua Desert (Mexico) and possible forcings. *The Holocene*, 8, 1105-1114.
- Rozanski, K. & Gonfiantini, R. (1990). Isótopos en estudios climatológicos: Los isótopos ambientales nos están ayudando a comprender el clima mundial. *Boletín del OIEA*, 4, 9-15.
- Saldarriaga, A.T., Martínez, J.I. (2010). Ecology of non-marine Ostracoda from La Fereservoir (El Retiro Antioquia) and their potential application in paleoenvironmental studies. *Rev. Acad. Col. Cienc.* 34, 397-409.
- Smith, A., Wynn, P., Barker, P., Leng, M., Noble, S., Tych, W. (2016). North Atlantic forcing of moisture delivery to Europe throughout the Holocene. *Scientific Reports*, 6, 1-6.
- Smol, J. P., Birks, H. J. B, Last, W. M. . (2001). *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments* (Vol. 3). The Netherlands Kluwer Academic Publishers.
- Smol, J. P., (2008). *Pollution of Lakes and Rivers: A paleoenvironmental perspective* (2da ed.). Oxford Blackwell, Publishing.
- Stutz, S., Tonello, M., González, M., Navarro, D., Fontana, S. (2014). Historia ambiental de los lagos someros de la llanura Pampeana (Argentina) desde el Holoceno medio: Inferencias paleoclimáticas. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, 21, 119-138.
- Uriarte, A.. (2003). La Última Glaciación In S. C. d. P. d. G. Vasco (Ed.), *Historia del clima en la Tierra* (1° ed.). España.
- Viehberg, F. (2006). Freshwater ostracod assemblages and their relationship to environmental variables in waters from northeast Germany. *Hydrobiologia*, 571, 213-224.
- Vázquez, Y. (2015). *El Holoceno tardío en el Lago Lacandón (Chiapas, México): Cladóceros como indicadores de las dinámicas ambientales*. (Licenciatura), Universidad Nacional Autónoma de México, México.

- Vázquez, M., Correa-Metrio, A., Zawisza, E., Franco-Gaviria, J., Pérez, L., Romero, F., Prado, B., Charqueño-Celis, F., Esperón-Rodríguez, M. (2016). Decoupled lake history and regional moisture availability in the middle elevations of tropical Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 33, 355-364.
- Venables, W., Smith, D., R Code Team. (2016). An introduction to R: Notes on R: A Programming Environment for Data Analysis and Graphics Version 3.3.2.
- Villanueva, M. J. (2010). Chiapas: Selva Lacandona Retrieved from www.carlosslim.com/pdf/wwf/fs15-chiapas-lacandona.pdf website:
- Walter Anthony, K. M., Zimov, S. A., Grosse, G., Jones, M. C., Anthony, P. M., Chapin III, F. S., Finlay, J. C., Mack, M. C., Davydov, S., Frenzel, P. & Frolking, S. (2014). A shift of thermokarst lakes from carbon sources to sinks during the Holocene epoch. *Nature*, 000, 1-5.
- Wanner, H., Beer, J., Bütikofer, J., Crowley, T., Cubasch, U., Flückiger, J., Gosse, H., Grosjean, M., Joos, F., Kaplan, J., Küttel, M., Müller, S., Prentice, I., Solomina, O., Stocker, T., Tarasov, P., Wagner, M., Widmann, M. (2008). Mid- to Late Holocene climate change: an overview. *Quaternary Science Reviews*, 1-38.
- Watts, W.A. & Bradbury, J.P. (1982). Paleocological studies at Lake Patzcuaro on the west-central Mexican Plateau and at Chalco in the Basin of Mexico. *Quaternary Research* 17 (1), 56-70.
- Weltz, R. G. (1981). *Limnología* (Omega Ed.). Barcelona
- Whatley, R. C. (1988). Population structure of ostracods: some general principles for the recognition of paleoenvironments In P. De Deckker, Colin, J.-P. & Peypouquet, J.P. (Ed.), *Ostracoda in the Earth Sciences*. Amsterdam Elsevier.
- Williamson, C. E., Saros, J. E., Vincent, W. F. & Smol, J. P. (2009). Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change. *Limnol. Oceanogr.*, 56 (6, part 2), 2273-2282.