



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

INSTITUTO DE GEOLOGÍA

“EVIDENCIAS DE CAMBIO CLIMÁTICO
DURANTE EL PLEISTOCENO-Holoceno EN
LA REGIÓN OCCIDENTAL DE MÉXICO A
TRAVÉS DEL ANÁLISIS PALINOLÓGICO EN
SEDIMENTOS DEL LAGO DE ZIRAHUÉN,
MICHOACÁN”.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

**MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
(BIOLOGÍA AMBIENTAL)**

P R E S E N T A

ESPERANZA TORRES RODRÍGUEZ

TUTORA DE TESIS: DRA. MARIA DEL SOCORRO LOZANO GARCÍA

DIRECTORA DE TESIS: DRA. MARÍA DEL SOCORRO LOZANO GARCÍA
PRESIDENTE: DRA. BEATRIZ ORTEGA GUERRERO
VOCAL: DRA. BLANCA LORENA FIGUEROA RANGEL
SUPLENTE: DRA. LAURA CALVILLO CANADELL
SUPLENTE: DRA. MARGARITA ERNA CABALLERO MIRANDA

MÉXICO, D.F.

MAYO DEL 2010



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

INSTITUTO DE GEOLOGÍA

“EVIDENCIAS DE CAMBIO CLIMÁTICO
DURANTE EL PLEISTOCENO-Holoceno EN
LA REGIÓN OCCIDENTAL DE MÉXICO A
TRAVÉS DEL ANÁLISIS PALINOLÓGICO EN
SEDIMENTOS DEL LAGO DE ZIRAHUÉN,
MICHOACÁN”.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

**MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
(BIOLOGÍA AMBIENTAL)**

P R E S E N T A

ESPERANZA TORRES RODRÍGUEZ

TUTORA TESIS: DRA. MARIA DEL SOCORRO LOZANO GARCÍA

DIRECTORA DE TESIS: DRA. MARÍA DEL SOCORRO LOZANO GARCÍA

PRESIDENTE: DRA. BEATRIZ ORTEGA GUERRERO

VOCAL: DRA. BLANCA LORENA FIGUEROA RANGEL

SUPLENTE: DRA. LAURA CALVILLO CANADELL

SUPLENTE: DRA. MARGARITA ERNA CABALLERO MIRANDA

MÉXICO, D.F.

MAYO DEL 2010

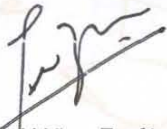
Dr. Isidro Ávila Martínez
Director General de Administración Escolar, UNAM
Presente

Me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día 22 de marzo de 2010, se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de la alumna **TORRES RODRÍGUEZ ESPERANZA** con número de cuenta **401108527** con la tesis titulada **"EVIDENCIAS DE CAMBIO CLIMÁTICO DURANTE EL PLEISTOCENO-HOLOCENO EN LA REGIÓN OCCIDENTAL DE MÉXICO A TRAVÉS DEL ANÁLISIS PALINOLÓGICO EN SEDIMENTOS DEL LAGO DE ZIRAHUÉN, MICHOACÁN"**, realizada bajo la dirección de la **DRA. MA. DEL SOCORRO LOZANO GARCÍA**:

Presidente: DRA. BEATRIZ ORTEGA GUERRERO
Vocal: DRA. BLANCA LORENA FIGUEROA RANGEL
Secretario: DRA. MA. DEL SOCORRO LOZANO GARCÍA
Suplente: DRA. LAURA CALVILLO CANADELL
Suplente: DRA. MARGARITA ERNA CABALLERO MIRANDA

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, D.F., a 27 de abril de 2010.


Dr. Juan Núñez Farfán
Coordinador del Programa

c.c.p. Expediente de la interesada

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Posgrado en Ciencias Biológicas, UNAM por permitirme llevar a cabo mis estudios de Maestría.

Agradezco a CONACYT por otorgarme la beca para realizar a cabo mis estudios durante el posgrado.

Al proyecto PAPIIT IN212606

Al apoyo económico otorgado por el Instituto de Geología para finalizar la escritura de este trabajo.

Al Comité tutor de este trabajo conformado por la Dra. María del Socorro Lozano García, por la Dra. Beatriz Ortega Guerrero, por la Dra. Margarita Erna Caballero Miranda, por la Dra. Blanca Lorena Figueroa Rangel y por la Dra. Laura Calvillo Canadell.

Agradezco a mi papá por ser mi apoyo siempre, por sus consejos y por sus enseñanzas.

A Ana María Sánchez por seguir siendo mi segunda mami y a mis hermanos Violeta y Rafael.

Agradezco muuuuuuuucho a mi tutora, la Dra. María del Socorro Lozano García por darme la oportunidad de aprender de ella. Por darme la oportunidad de trabajar con ella y por todo el apoyo que me ha brindado a lo largo de estos años no sólo con lo referente a palinología sino por todas las revisiones y comentarios que ha hecho a cada trabajo que he presentado en paleontología. Por creer siempre en mí y en mis ideas locas. ¡Muchas gracias Socorro!! Recuerda que debemos llegar a estrellato!

Agradezco a la M. en C. Susana Sosa Nájera por todas sus enseñanzas; por la amistad que siempre me ha brindado y por todos sus consejos.

Agradezco especialmente a la Dra. Beatriz Ortega Guerrero por permitirme utilizar parte de sus datos en este trabajo, por todos sus comentarios y sus consejos. Muchas gracias!

Agradezco a la Dra. Margarita Erna Caballero Miranda por formar parte del Comité Tutorial, por todos sus comentarios para mejorar el trabajo y por todo lo que me ha enseñado.

Un especial agradecimiento a la Dra. Blanca Lorena Figueroa Rangel por enseñarme la parte estadística y por todo el apoyo que me ha brindado cada vez que he recurrido a ella. ¡Muchas gracias!

A la Dra. Laura Calvillo Canadell por sus consejos y principalmente por su amistad. Gracias Laura! por darme ánimos y por la amistad que has brindado siempre. Pronto llegaremos a la fama! Jajajajaja Recuérdalo!!!

Al Dr. Sergio Cevallos por sus consejos, su ayuda y por escuchar mis exposiciones.

Al M en C. Gabriel Vázquez por toda su ayuda y por permitirme utilizar algunos de sus datos, citados en este trabajo.

A todos mis amigos, compañeros y profesores de Paleosuelos: Dra. Jorge Gama Castro, Dra. Carolina Jasso, Dr. Sergey Sedov, Dra. Elizabeth Solleiro, Héctor Cabadas y muy

especialmente, a mis queridos amigos y cómplices Berenice (ya Maestra) y César por todos esos momentos de diversión en medio de la desesperación y por todo lo que nos espera jajajaja

Especial agradecimiento al Dr. Jorge Gama Castro y a la Dra. Carolina por escucharme siempre y brindarme su amistad siempre que lo necesito. Muchas gracias por todo lo que me han enseñado y por todo el apoyo que nos han dado.

Nuevamente al Cartel del Hueso: Patolín y Salchichita, Ladybebeauty, Depregallaitor y babyraptor por seguir en la búsqueda del hueso!

A mi amigos del posgrado que fueron un gran apoyo: Claus, nuevamente Bere y César; Yajaira, Adriana Galván, Gabriel y Elia; Maricarmen, y Susana Sosa.

A mis amiguitos biólogos que siguen conmigo: Cirene, Jimena, Lety, Sinué, Sherezada, Gaby Martínez, Itzel, y Alicia (Licha).

A mi querida amiga Fabiola (manzana) por seguir ahí...

El hombre se consume a causa de dos actos instintivamente realizados, que agotan las fuentes de su existencia. Dos verbos expresan todas las formas que toman estas dos causas de muerte: “Querer” y “Poder”... “Querer” nos abraza y “Poder” nos destruye; pero “Saber” constituye a nuestro débil organismo en un perpetuo estado de calma.

Honorato de Balzac

INDICE

	Página
I. Introducción	15
I.1 Hipótesis y objetivos	18
I.2 Antecedentes	19
II. Área de estudio	23
III. Metodología	40
IV. Resultados	45
IV.1 Geocronología y litoestratigrafía de la secuencia lacustre ZIR03-I	45
IV.2 Análisis de polen	48
IV.4 Asignación taxonómica de micro y megasporas de <i>Isoetes</i>	49
IV.5 Zonación palinológica	58
V. Relación de la vegetación con el ambiente	70
VI. Discusión e interpretación de resultados	78
VII. Comparación de la secuencia ZIR03-I con el registro de Lagos cercanos (Pátzcuaro, Zacapu y Cuitzeo).	90
VIII. Implicaciones paleoclimáticas	95
IX. Conclusiones	100
X. Literatura citada	102
XI. Anexos	110

FIGURAS

	Página
Figura 1. Delimitación de la cuenca del lago de Zirahuén	24
Figura 2. Localización de los lagos más cercanos a Zirahuén	25
Figura 3. Mapa geológico de la cuenca de Zirahuén	27
Figura 4. Mapa de vegetación regional de la cuenca de Zirahuén	35
Figura 5. Sitio de colecta del núcleo sedimentario ZIR03-I	40
Figura 6. Modelo de edad y tasas de sedimentación del núcleo ZIR03-I	46
Figura 7. Litoestratigrafía del núcleo sedimentario ZIR03-I	47
Figura 8. Megaesporas de <i>Isoetes</i> tipo 1	51
Figura 9. Diagrama palinológico regional	65
Figura 10. Diagrama palinológico local	66
Figura 11. Diagrama palinológico sintético	67
Figura 12. Componentes clásticos, susceptibilidad magnética y elementos selectos del núcleo sedimentario ZIR03-I	68
Figura 13. Componentes biogénicos del núcleo ZIR03-I	68
Figura 14. Asociaciones de diatomeas del núcleo ZIR03-I	69
Figura 15. Diagrama de ordenación ACC de polen acuático	71
Figura 16. Diagrama de ordenación ACC de taxa acuáticos	72
Figura 17. Diagrama de ordenación ACC de polen terrestre	76
Figura 18. Diagrama de ordenación ACC de taxa terrestres	77
Figura 19. Síntesis de cambios paleoambientales identificados en la secuencia ZIR03-I	89
Figura 20. Comparación del registro ZIR03-I con los registros de Pátzcuaro, Zacapu y Cuitzeo	94

TABLAS

	Página
Tabla 1. Fechamiento de radiocarbono del núcleo ZIR03-I	46
Tabla 2. Especies de <i>Isoetes</i> en México	49
Tabla 3. Coeficientes de regresión para palinomorfos acuáticos	70
Tabla 4. Valores de la prueba de t para palinomorfos acuáticos	70
Tabla 5. Coeficientes de regresión para palinomorfos terrestres	74
Tabla 6. Valores de la prueba de t para palinomorfos terrestres	74
Tabla 10. Características actuales de las cuencas de Zirahuén, Pátzcuaro, Zacapu y Cuitzeo	90

LÁMINAS

Lámina I Árboles	52
Lámina II Herbáceas	53
Lámina III Herbáceas	54
Lámina IV Pteridofitas	55
Lámina V Acuáticas	56
Lámina VI Algas, cladóceros y quiromínidos	57

RESUMEN

Se llevó a cabo un estudio palinológico de la secuencia sedimentaria ZIR03-I que abarca los últimos 17,000 años; colectada en la zona norte del lago de Zirahuén, Michoacán, con la finalidad de documentar cambios paleoambientales y paleoclimáticos durante el Pleistoceno tardío-Holoceno. A pesar de las investigaciones realizadas en varios sitios del centro de México, existen interpretaciones contradictorias sobre las condiciones de humedad en el centro-occidente de México durante el Último Máximo Glaciar (UMG) y con esta investigación se pretende aportar información que contribuya a dilucidar esta controversia.

A partir de los datos palinológicos y comparando esta información con los datos de diatomeas y los geoquímicos obtenidos en trabajos previos, se identificaron seis periodos caracterizados por cambios notorios tanto en la vegetación regional como en la local que se resumen a continuación:

De 17,000 a 13,500 cal AP la vegetación regional se caracteriza por la presencia de un bosque de pino alrededor del lago mientras que la vegetación local se encuentra representada por la comunidad del helecho acuático *Isoetes* tipo 1. Esto sugiere el establecimiento de condiciones más frías y de menor humedad que en el presente, interpretación que es consistente, con la asociación de diatomeas dominada por taxa litorales epifíticos que indican un lago somero de agua dulce, ligeramente alcalino.

En el intervalo de 13,500 a 12,100 cal AP la vegetación regional cambia convirtiéndose en un bosque de pino-encino y *Alnus* sugiriendo condiciones más húmedas mientras que en el lago se registra una disminución en los porcentajes de *Isoetes* tipo 1 así como el establecimiento de diatomeas planctónicas indicando un incremento gradual en la profundidad.

Entre 12,100 y 7,160 cal AP se registra un hiato sedimentario, cuya posible causa pudo deberse a la erosión en la orilla del lago causada por una disminución en el nivel lacustre.

De 7,160 a 3,700 cal AP en la vegetación regional se registra la presencia de un bosque de pino-encino, *Alnus* así como la presencia de elementos mesofíticos tales como *Carpinus* lo cual indica condiciones de mayor humedad para este periodo. Dentro de lago se registra nuevamente disminución en la comunidad del helecho *Isoetes* así como la aparición del alga *Gloeotrichia* aff. *echinulata*. Esto sugiere condiciones de eutroficación en el lago que coinciden

con el incremento de los porcentajes de la diatomea *Aulacoseira ambigua* var. *robusta*, que indica el desarrollo de un lago más profundo y eutrófico.

De 3,700 a 1,400 cal AP la vegetación regional registra una disminución en las comunidades de *Quercus* y *Alnus* ligada a un incremento en el polen de herbáceas sugiriendo condiciones más secas para este intervalo. Además, se documenta la aparición del polen de maíz a los 3,560 años cal AP evidenciando el inicio de la agricultura alrededor de la cuenca. En adición, el incremento de la diatomea *Diploneis elliptica* y la disminución de *Aulacoseira ambigua* var. *robusta* indica una reducción en el nivel lacustre.

A partir de los 1,400 cal AP al presente la vegetación regional se encuentra compuesta por un bosque de pino-encino y por un incremento en los porcentajes de polen de herbáceas y de pteridofitas sugiriendo condiciones secas alrededor del lago. Dentro del lago la asociación de diatomeas está conformada por las especies *Cyclotella ocellata* y *Hantzschia amphioxys* las cuales indican una reducción en el nivel lacustre y el establecimiento de un lago eutrófico; mismo que se encuentra sustentado por el incremento en los porcentajes de las algas *Coelastrum*, *Staurastrum* así como el incremento de los valores del cladóceros *Bosminia longirostris*.

ABSTRACT

We carried out a palynological study of the sedimentary sequence ZIR03-I for the last 17,000 years. This sequence was collected at the northern littoral zone of the Zirahuén lake, Michoacán. The goal of this investigation was to document palaeoenvironmental and palaeoclimatic changes during the late Pleistocene-Holocene. Although the numerous investigations that have been done in central Mexico, there are contradictory interpretations about the moist conditions on the western-central Mexico during the Last Maximum Glacial (LMG). The results of this investigation will provide information to contribute to elucidate this controversy.

From the comparison of palynological, limnological and geochemical data six time periods were recognized. Each one of them was characterized by changes in regional and local vegetation and are described as follows:

During the interval of 17,000 to 13,500 cal BP regional vegetation was characterized by the presence of pine forest around the lake, local vegetation was represented by the community of the aquatic fern *Isoetes* type 1, which suggests cooler and less moist conditions than the present. This interpretation is consistent with the information provided by diatom association dominated by littoral epiphytic taxa which indicates a shallow fresh slightly alkaline water lake.

From 13,500 to 12,100 cal BP, regional vegetation was represented by a pine-oak forest with *Alnus*, suggesting an increment in moister conditions in the zone. The lake registered a diminution of *Isoetes* type 1 and the establishment of planktonic diatoms, indicating a gradual increment in depth.

Between 12,100 to 7,160 cal BP a sedimentary hiatus is present in the sequence. Lake erosion caused by a low in the lacustrine level could be responsible of this hiatus.

From 7,160 to 3,700 cal BP regional vegetation was characterized by a pine-oak forest with mesophytic elements like *Carpinus*. These indicate moister conditions for this time period. Palaeolimnological data shows a reduction of *Isoetes* and apparition of *Gloeotrichia* aff. *Echinulata*, suggests eutrophic conditions in the lake. This coincides with the abundance of the diatom *Aulacoseira ambigua* var. *robusta*, which indicates the development of a deeper and eutrophic lake.

Between 3,700 to 1,400 cal BP there was a reduction of *Quercus* and *Alnus* communities and an increment of herbaceous pollen, which suggested dryer zone conditions for this interval. Also for the first time, it was reported the apparition of *Zea mays* at 3,560 years cal BP; this evidenced the beginning of agriculture in the basin. In addition the increment of the diatom *Diploneis elliptica* and the diminishing of *Aulacoseira ambigua* var. *robusta* indicated a reduction of lacustrine level.

From 1,400 cal BP to the present the pine-oak forest with herbaceous and pteridophytes pollen suggested dryer conditions around the lake. Diatom association (*Cyclotella ocellata* and *Hantzschia amphioxys*) indicated a reduction in lacustrine level and the development of an eutrophic lake. This information was supported by percentages increment of algae *Coelastrum*, *Staurastrum* and Cladocera (*Bosminia longirostris*).

Introducción

El clima es un sistema complejo que se encuentra regulado por factores naturales tales como la latitud, la altitud, la continentalidad, las corrientes marinas, los vientos, y se caracteriza por ser altamente dinámico. En las últimas décadas se han realizado investigaciones sobre las variaciones o cambio del sistema climático. Dichas variaciones pueden ocurrir en diferentes escalas temporales. Una de las evidencias más sobresalientes acerca de las fluctuaciones del clima en la Tierra, cuyo estudio ha tomado gran importancia ya que permite estudiar las modificaciones que ocurrieren dentro de las distintas partes del sistema climático, es el último ciclo glacial donde las temperaturas globales disminuyeron notablemente afectado, entre otros, a la distribución de la vegetación.

La última glaciación registrada para el Hemisferio norte (Norteamérica y Europa) conocida como Weichseliana/Wisconsiniana (115,000-10,000 años) comenzó con un enfriamiento hace 115,000 años durante la cual se originaron dos grandes masas de hielo continental que cubrieron Norteamérica y parte de Europa. La máxima extensión de hielo continental para Norteamérica (Lauréntida) ocurre dentro del periodo denominado Último Máximo Glaciar (UMG) entre 22,000 y 18,000 años cal AP (Pleistoceno tardío) provocando cambios en los patrones de la circulación atmosférica global, en la temperatura y en las distribución de los organismos, ya que éstos responden a su ambiente, y en especial, a las variables ambientales de precipitación y de temperatura (Ruddiman, 2000).

El fin del último periodo glacial (ca. 12,000 años) estuvo marcado por un cambio hacia condiciones interglaciales más cálidas (transición Pleistoceno-Holoceno) originando modificaciones en los patrones de distribución de las comunidades vegetales ya que éstas responden a las variaciones de precipitación y de temperatura. Las evidencias de la distribución pasada de las comunidades vegetales en respuesta a las fluctuaciones climáticas, proviene de los microfósiles (granos de polen y esporas) que quedan preservados dentro de sedimentos que se depositan en lagos y su análisis, nos permite inferir los cambios paleoambientales que tuvieron lugar durante estos procesos de cambio climático.

En México, los sedimentos de las cuencas lacustres en la región central a lo largo de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) ofrecen la posibilidad de contribuir al conocimiento de las variaciones climáticas en las zonas tropicales de altura durante el Pleistoceno-Holoceno y

por consiguiente la respuesta que tuvieron las comunidades vegetales al cambio hacia condiciones más cálidas que caracterizan el Holoceno.

Actualmente el clima del centro de México está influenciado por cuatro elementos de la circulación atmosférica global: por la acción de los vientos alisios, por las celdas subtropicales de alta presión (Bermudas-Azores en el Atlántico y centro del Pacífico), y por la acción de los vientos del oeste. Durante el verano, el centro de México se caracteriza por presentar una máxima precipitación ya que los vientos alisios dominan trayendo humedad desde el golfo de México y el Caribe y por el sistema monzónico que provee humedad desde el Pacífico tropical oriental a medida que la Zona Intertropical de Convergencia (ZITC) se desplaza hasta su posición más norteña. Por otro lado, durante el invierno, los vientos del oeste traen condiciones de humedad al extremo noroeste del país. A medida que la ZITC se acerca hacia el ecuador y las celdas de alta presión subtropical (Bermudas-Azores y la del Pacífico) se extienden, condiciones de menor humedad alcanzan la mayor parte del país (Mosiño Aleman y García, 1974; Higgs *et al.*, 1998; Metcalfe *et al.*, 2000; Metcalfe y Davies, 2007).

Sin embargo, se sabe que las condiciones climáticas actuales del país no han sido siempre iguales sino que han variado a lo largo del tiempo. Durante el UMG, los patrones de circulación atmosférica presentaron un desplazamiento hacia una posición más sureña que la actual (Andersen y Borns, 1994; Bradbury, 1997; Ruddiman, 2002, entre otros) debido a la presencia de la gran masa de hielo continental norteamericana. Para explicar el efecto de este desplazamiento latitudinal de los patrones de circulación en los ambientes del centro de México, se planteó una hipótesis que sugiere que los vientos del oeste alcanzaran posiciones más meridionales influenciando el centro occidental de México provocando un incremento en la precipitación invernal y en los niveles lacustres en el lago de Pátzcuaro localizado en el centro-occidente de México (Bradbury, 1997 y 2000). Sin embargo, otros registros procedentes de regiones al norte y al oriente de Pátzcuaro, como Zacapu, Cuitzeo y sitios que se encuentran en la región central como Chalco contrastan con el registro de Pátzcuaro, ya que indican condiciones relativamente secas alrededor del UMG (Ortega *et al.*, 2002; Lozano y Ortega, 1997).

Con el objeto de aportar datos que contribuyan a esclarecer dicha polémica, en el presente trabajo se llevó a cabo un estudio sobre los cambios en las comunidades vegetales mediante el análisis palinológico en sedimentos del lago de Zirahuén, Michoacán para los últimos 17,000 años. Cabe mencionar que este trabajo es parte de un proyecto multidisciplinario que documenta la historia de la evolución ambiental y climática en Zirahuén, registrada en sus

sedimentos lacustres. En este proyecto se analizan los componentes clásticos, volcanoclásticos y biogénicos a partir de los cuales infieren diferentes fluctuaciones en las tasas de erosión alrededor de la cuenca y niveles lacustres con base en el registro de diatomeas; estudios que en su mayoría se correlacionan con el registro palinológico de este trabajo (Aston, 2009; Vázquez *et al.*, en prensa; Lozano *et al.*, 2010; Ortega-Guerrero *et al.*, en revisión).

Hipótesis:

Las condiciones ambientales durante el glacial tardío (18,000-15,000 años cal AP) y el glacial terminal (15,000-12,000 años cal AP) en las cuencas de Pátzcuaro y Zirahuén se caracterizaron por la existencia de ambientes húmedos relacionados al desplazamiento de los vientos del oeste hacia latitudes meridionales alcanzando el centro-occidente del México. El Holoceno en cambio, estuvo marcado por una tendencia hacia condiciones menos húmeda lo cual modificó las comunidades boscosas.

Objetivos:

- Determinar mediante el análisis palinológico del núcleo ZIR03-I el tipo de cobertura vegetal, las variaciones en composición y la abundancia de los diferentes taxa.
- Inferir los cambios climáticos a través de la reconstrucción de la paleovegetación en la cuenca del lago de Zirahuén para los últimos 17,000 años.
- Identificar los cambios en los niveles lacustres y correlacionarlos con eventos climáticos con base en el registro de palinomorfos y con los conjuntos de diatomeas previamente analizados para el lago de Zirahuén, durante los últimos 17,000 años.
- Identificar el inicio de la actividad humana alrededor de la cuenca con base en la aparición de indicadores antrópicos como polen de maíz y deforestación; documentar a través del registro de partículas de carbón evidencias de agricultura y actividad volcánica.
- Comparar las evidencias paleoambientales del núcleo ZIR03-I con el registro de Cuitzeo, Zacapu y Pátzcuaro y explorar la posible existencia de un patrón climático en la región centro-occidental durante ciertos periodos (15,000, 10,000, 6,000 y 3000 años).
- Correlacionar los eventos climáticos identificados en el centro-occidente con los registrados en otras zonas tropicales de altura (Lerma y Chalco entre otros).

Antecedentes

En México, los estudios de cambio climático se han enfocado en el Cuaternario tardío de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), ya que ésta constituye una zona con una gran variedad de cuencas endorreicas en donde se han acumulado a lo largo del tiempo amplios espesores de sedimentos, a partir de los cuales es posible inferir los cambios ambientales que tuvieron lugar en el pasado.

Los estudios de reconstrucción paleoambiental llevados a cabo en el centro del país a partir del análisis de sedimentos lacustres se han realizado principalmente en la cuenca de México (Bradbury 1989; Lozano et al. 1993; Caballero y Ortega, 1998; Sosa y Lozano 2003), en la cuenca del Alto Lerma (Metcalf et al., 1991; Caballero et al., 2001 y 2002) y en los lagos de Pátzcuaro (Watts y Bradbury, 1982; Bradbury, 1997; Bardbury, 2000; Metcalf et al. (2006), Cuitzeo (Velázquez et al., 2000; Israde-Alcántara et al., 2002) y Zacapu (Metcalf et al., 1984; Metcalf, 1992 y 1995; Petrequin, 1994; Xelhuantzi, 1994; Arnould et al., 1997; Ortega et al., 2002) en el estado de Michoacán.

Uno de los registros que ha generado una problemática para el conocimiento de las condiciones climáticas que tuvieron lugar en el centro del México durante UMG (ca. 20,000 años) y durante el fin del último periodo glacial (ca. 12,000 años) ha sido el del lago de Pátzcuaro a partir del cual Bradbury (2000) concluye que durante el UMG los vientos del oeste predominaron en el centro occidental del país, provocando un incremento en la precipitación de invierno originando un incremento en los niveles lacustres de dicho lago. Esta interpretación se encuentra basada en el registro palinológico propuesto por Watts y Bradbury (1982) y en el de las asociaciones de diatomeas y geoquímica del agua de Bradbury (2000) para los últimos 48,000 años. De manera general, el registro palinológico del mismo sitio señala que la vegetación terrestre durante el Wisconsiniano medio-tardío (48,000-10,000 años cal AP) no presentó cambios significativos y que estuvo dominada en su mayoría por polen de *Pinus*, *Quercus* y *Alnus* y por granos de polen tipo *Juniperus*. La desaparición del polen de tipo *Juniperus* caracteriza el fin del Pleistoceno y el principio del Holoceno, misma, que está relacionada con un incremento en el polen de *Artemisia* y *Ambrosia*, considerados por Watts y Bradbury (1982) como indicadores de condiciones más frías y más secas que en el presente. Durante el Holoceno medio el polen de Chenopodiineae puede indicar la presencia de la agricultura temprana en la región; esto lo relacionan con la disminución en los porcentajes de *Alnus* registrados durante el Holoceno tardío; considerados por estos mismos autores como respuesta al desarrollo de la agricultura temprana y posiblemente a una tendencia hacia condiciones más secas.

Con base en el conjunto de diatomeas se reconstruyen de 47,000 a 10,000 cal AP niveles lacustres altos dados por la dominancia de diatomeas planctónicas de agua dulce, con excepción del periodo de 47,000 a 38,000 cal AP caracterizado por la asociación de *Navicula seminulum*, *Staurosira construens* y *Stephanodiscus oregonicus* que indican niveles lacustres someros (Bradbury, 2000). El Holoceno temprano-medio estuvo caracterizado por porcentajes fluctuantes de *Aulacoseira ambigua* y especies de *Fragilaria* los cuales indican una baja en el nivel lacustre y un lago más eutrófico. El Holoceno medio caracterizado por especies de *Aulacoseira* (*A. distans* y *A. pfaffiana*) indican un nivel bajo que Bradbury sugiere como una somerización progresiva. Después de 5,000 cal AP la presencia de *Synedra* indica climas más secos. Para el Holoceno tardío, las fluctuaciones de las diferentes asociaciones, la presencia de capas de ostrácodos (sobre todo de 4,600 a 3,800 cal AP y 2,800-2,000 cal AP) y el incremento en los valores de Ca indican niveles lacustres bajos y una tendencia hacia condiciones más secas, con excepción de algunas fluctuaciones como la registrada a los 3,200 y a los 2,400 cal AP por el incremento en los porcentajes de *Aulacoseira ambigua*.

Otra investigación paleolimnológica en Pátzcuaro que se llevó a cabo por Metcalfe *et al.* (2006) donde analizan 4 núcleos sedimentarios (C4, Patz/3, Patz/KD y Patz/KJ) perforados en diferentes lugares del lago. Estos autores reportan el registro de diatomeas del núcleo C4 que es similar al reportado por Bradbury (2000) para el Pleistoceno tardío. Ambos núcleos muestran porcentajes significativos de la diatomea planctónica *Stephanodiscus niagarae* (usualmente 10 a 40 % reportada por Bradbury a los 15,000 AP). Bradbury (2000) sugiere que ésta pudo haber florecido durante el otoño en Pátzcuaro y ser indicativa de condiciones frías, con precipitación y presencia de tormentas. Asimismo, Bradbury (2000) reporta la presencia de *Aulacoseira* sp., la cual es reportada por Metcalfe *et al.* (2006) como *Aulacoseira ambigua* var. *robusta*; una diatomea fuertemente silificada. Metcalfe *et al.* (2006) mencionan que con base en datos ecológicos del este de África, *Aulacoseira* var. *robusta* indica altos niveles de sílice y una circulación profunda. En ambos registros hay porcentajes bajos de diatomeas perifíticas (el anterior género *Fragilaria*) y algunas epífitas tales como *Cocconeis placentula*. La flora ha sido explicada como la representación de un lago con altos niveles lacustres y de condiciones frías, el cual se encontraba bien mezclado y presentaba altos niveles de sílice donde el agua clara se encuentra indicada por la presencia de abundantes espículas de esponjas preservadas en ambos núcleos.

Por otro lado durante el Holoceno temprano-medio (registrado en los núcleos C4 y en el de Bradbury y Watts (1982) se observa un cambio claro de las condiciones glaciales-interglaciales en el registro de diatomeas donde *A. ambigua* abruptamente se convierte en dominante en la base del Holoceno. El cambio abrupto que se observa en la flora de diatomeas

para el límite Pleistoceno-Holoceno representa un cambio en las condiciones climáticas dado por un cambio en la estacionalidad de la precipitación invierno-verano y un calentamiento causado por el establecimiento del régimen climático moderno (Bradbury, 2000) Posteriormente, para el Holoceno medio, ambos registros muestran un incremento en los taxa perifíticos como *A. distans* y *A. pfaffiana* los cuales son indicadores de aguas más someras que las previas al Holoceno medio.

Metcalfe *et al.* (2006) al igual que Bradbury (2000) reportan para el lago de Pátzcuaro el depósito de dos capas de ostrácodos durante los últimos 4,500 cal AP (Holoceno tardío); una presente en el núcleo C4 (4,300 cal AP) y otra en el núcleo Patz/3 (poco arriba de 4000 cal AP). O'Hara *et al.* (2003) sugiere que estas capas de ostrácodos fueron acumuladas periódicamente a través del resto del Holoceno siendo indicativas de intervalos de sequía a lo largo de la cuenca a través del Holoceno tardío. Asimismo, el registro de diatomeas indica bajos niveles lacustres para los últimos 2,000 años, con condiciones particularmente de agua somera asociada con las capas de ostrácodos. Metcalfe *et al.* (2006) sustentan las condiciones de humedad sugeridas por Watts y Bradbury (1982) y Bradbury (2000) para el fin del último periodo glacial. Durante el Holoceno temprano, el lago de Pátzcuaro permaneció con niveles altos, pero bajo un ambiente más estable y es a partir del Holoceno medio cuando, la cuenca de Pátzcuaro presenta una tendencia gradual hacia condiciones más secas (Metcalfe *et al.*, 2006).

Para la cuenca de Zacapu la cronología es pobre y hay evidencias de actividad volcánica. El registro de diatomeas indica niveles lacustres bajos, y el decremento de carbono orgánico y la susceptibilidad magnética sugieren condiciones particularmente secas, después de los 16,700 y hasta los 5,500 cal AP (Metcalfe, 1992 y 1995; Ortega-Guerrero *et al.*, 2002). El registro palinológico que se restringe únicamente al Holoceno sugiere la existencia de condiciones templadas subhúmeda entre 9,000 y 8,200 cal AP por la existencia de boques densos de pino-encino y *Alnus*. De 8,200 a 5,400 cal AP se sugiere condiciones templadas semisecas con base en el incremento del polen de Poaceae y Chen-Am., seguido por un incremento en la humedad y en el nivel lacutre de 5, 400 a 2,700 cal AP marcado por el incremento en los porcentajes de polen de pino-encino, *Alnus* y *Arenaria* (Xelhuantzi, 1991).

En el lago de Cuitzeo Velázquez-Durán (2003) reporta que durante el UMG (22,000 a 21,000 cal AP) un lago somero y salobre donde el registro palinológico se encuentra representado por *Pinus*, *Quercus* y *Alnus*, sin embargo, sus valores son muy bajos, mientras que los conjuntos de herbáceas (pastos, compuestas y chenopodiáceas) son importantes, llegando a valores máximos de hasta 80%. Entre 21,000 y 10,000 cal AP las tasas de sedimentación son muy bajas lo cual es atribuido a la posible presencia de un hiato en la sedimentación. El registro

por Israde-Alcántara *et al.* (2002) de la diatomea *Cyclotella meneghiniana*, a partir de los 10,000 cal AP cal AP hasta el presente, indica niveles lacustres bajos y turbios en el lago. Las asociaciones de diatomeas y polen observados en los últimos 900 años en el lago de Cuitzeo sugieren un incremento de erosión y condiciones de turbidez y eutroficación y una tendencia a condiciones más secas (Velázquez *et al.*, 2000). Esto se observa también en las cuencas aledañas de Pátzcuaro y Zacapu. Probablemente la presencia del hombre ha contribuido a estos cambios de condiciones ambientales de estos lagos (Israde-Alcántara *et al.*, 2002).

Con relación a las investigaciones en el lago de Zirahuén, los cambios ambientales pasados han sido documentados principalmente a través del análisis de indicadores paleolimnológicos (diatomeas), susceptibilidad magnética, metales pesados y análisis de elementos traza para los últimos 1000 años (Metcalf *et al.*, 2004). Los altos valores de susceptibilidad magnética indican disturbio y erosión de los suelos alrededor del lago. Además, los conjuntos de diatomeas indican periodos de incremento en nutrientes de AD 1020-1250. La abundancia de *Aulacoseira ambigua* y *A. granulata* var. *angustissima* sugiere aguas turbias pero bien mezcladas. Esto pudo haber representado un periodo de descenso del nivel del lago sin embargo se requiere verificación a través del estudio de núcleos de sedimento más largos (Davies *et al.*, 2006).

Área de estudio

Fisiografía

La cuenca de Zirahuén (Figura 1) se localiza en la Subprovincia Neovolcánica Tarasca, dentro de la región hidrológica del Balsas, entre las coordenadas 19°21'14" y 19°29'32" N y 101°30'33" y 101°46'15" W (Chacón y Múzquiz, 1991). La zona se caracteriza por la presencia de rocas volcánicas de diversos tipos, depositadas en periodos sucesivos desde mediados del Terciario hasta el presente (Israde, 1999). El cuerpo lacustre se ubica en la región oeste de la cuenca (en la porción centro-norte del estado de Michoacán) a 2075 msnm y presenta una superficie de 10.48 km² con una profundidad de 40 m (Figura 1). Esta cuenca, está limitada por cadenas montañosas, serranías y lomeríos que la circundan por completo. Una franja de terrenos ribereños casi plana rodea al lago, esta franja es angosta en el lado oeste del lago, pero al norte y sur se extiende para formar pequeños valles en donde se ubican los pueblos Zirahuén y Agua Verde (Pérez-Calix, 1996). La región plana o de pendientes moderadas está formada principalmente por llanuras de origen aluvial, así como por pequeños lomeríos, cuyas elevaciones varían de 2,100 a 2,300 msnm (Pérez-Calix, 1996).

En la porción sur las planicies son sustituidas por un sistema de lomeríos que forman el límite de la cuenca, sus pendientes son moderadas y su altitud promedio es de 2,500 msnm. Además, en el interior de la región existen otros lomeríos que forman especies de "islas" las cuales sobresalen de los terrenos planos o están cercanos a prominencias como los cerros Juan Cabeza, Sanata Juana y Yugo, cuya altitud varía entre 2,200 y 2,500 y llega hasta los 2,800 m en el Cerro del Aguacate (Figura 1), la mayor elevación en el interior del área (Pérez-Cálix, 1996). Las principales prominencias se encuentran al este (cerros El Frijol, Burro, Janamo, y La Tapada) (Figura 1) configurando un sistema alto en el que las crestas alcanzan altitudes hasta de 3,300 m. Otra montaña alta es el Cerro Zirahuén (3,000 msnm) que es la principal eminencia de la Sierra Santa Clara del Cobre (Pérez-Cálix, 1996).

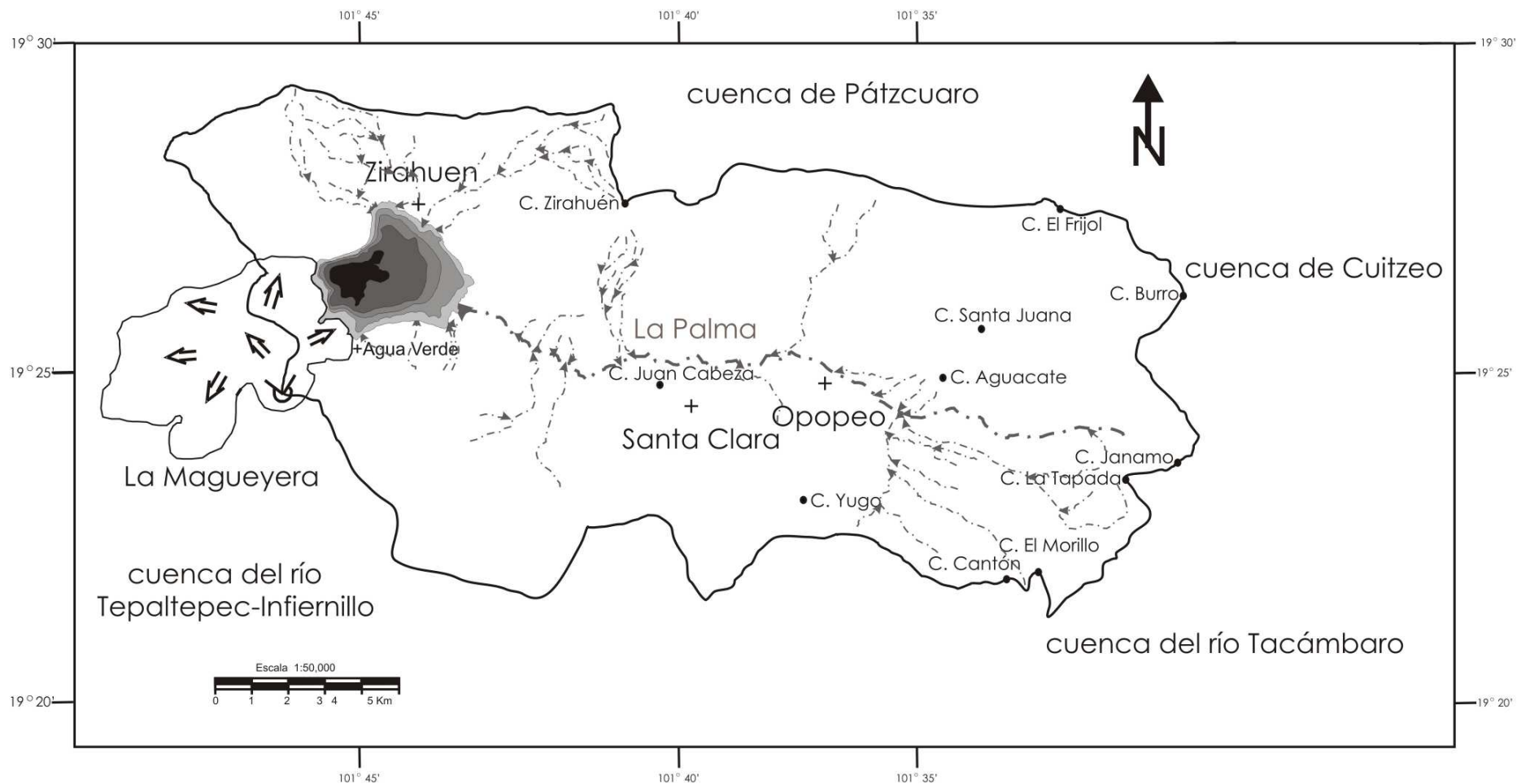


Figura 1. Delimitación de la cuenca de drenaje de Zirahuén, Michoacán. El cuerpo lacustre se ubica en la porción oeste de la cuenca. Las áreas grises y negras en el lago son curvas de contorno de 10 m de profundidad (Bernal-Brooks y MacCrimmon, 2000a). Se ilustran los principales poblados así como el curso del Río La Palma que es el único que fluye hacia la cuenca; éste fluye desde el este a través de los pueblos Santa Clara y Opopeo (Modificado de Vázquez, en preparación).

La cuenca de Zirahuén está limitada al norte por las cuencas del Lago de Pátzcuaro y del Lago de Cuitzeo y al sur por las cuencas del Río Tepaltepec-Infiernillo y del Río Tacámbaro (Figura 1). Los lagos más cercanos a ésta son Pátzcuaro, Cuitzeo y Zacapu localizados al norte de Zirahuén (Figura 2), siendo el lago de Pátzcuaro el más cercano a 12 km de distancia. En comparación con éste, Zirahuén es más pequeño (1045ha), menos salino y tres veces más profundo; presentando una profundidad promedio de 18 m y un volumen aproximado de $188 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Bradbury, 2000).

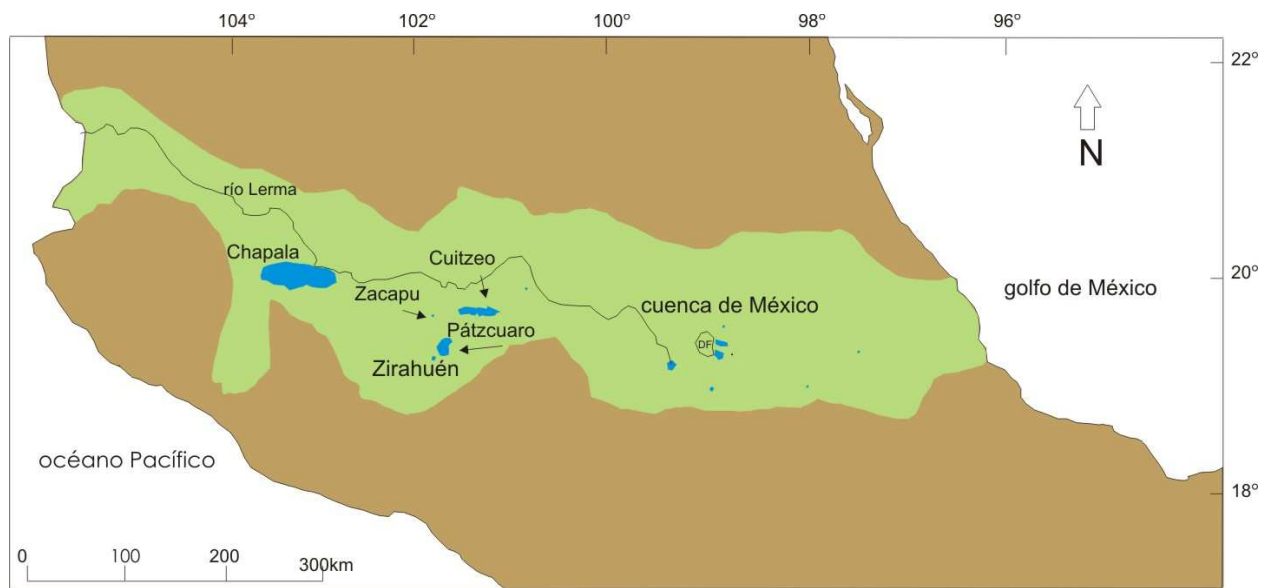


Figura 2. A. Localización de los lagos más cercanos Zirahuén; Pátzcuaro, Zacapu y Cuitzeo. Además se ilustran el lago de Chapala, la cuenca de México y el cauce del río Lerma (Modificado de Davies *et al.*, 2004 y Metcalfe S. E., 1997).

Geología

Las rocas más antiguas de la región pertenecen al Terciario superior, a partir del cual los procesos de vulcanismo, erosión y sedimentación, han sido los responsables de la estructura de la cuenca. Se han podido reconstruir dos fases de actividad volcánica en el área para la época Plio-cuaternaria (Demant *e tal.*, 1976): una correspondiente al Neógeno superior (Plioceno) que originó el Cerro Burro y otra correspondiente al Cuaternario, que generó las demás montañas y lomeríos. Los volcanes pleistocénicos de la región han tenido sólo una fase de actividad y han emitido un reducido volumen de lava; sus conos por lo general están bien conservados, lo que sugiere que las erupciones ocurrieron en el Cuaternario tardío (Demant *et al.*, 1976). En su mayoría las rocas se encuentran representadas por basaltos y andesitas; las rocas que ocupan menos extensión son las dacitas, las cuales están confinadas al Cerro Burro (Figura 3). La estructura volcánica más joven (datada por Ortega-Guerrero *et al.*, en revisión con una edad de 6560 ± 950 años) en la zona de drenaje corresponde a los flujos de lava de la Magueyera

(FLLM) (Figuras 1 y 3) localizada al suroeste del lago a 270 m sobre la superficie del lago cubriendo un área de 19 km². Los FLLM son una estructura andesítica compuesta principalmente de vidrio y plagioclasas y se sugiere que fue producto de una erupción efusiva a partir de fisuras localizadas cerca del centro del escudo. Estos flujos de lava cubren de manera parcial el volcán Los Cumburinos y los flujos de lava El Puerto (Ortega-Guerrero *et al.*, en revisión).

En la literatura se considera que el lago se formó durante el Pleistoceno, debido a una obstrucción por el derrame de lava de los flujos de la Magueyera (Chacón-Torres y Rosas-Monge, 1998). Se han registrado dos erupciones volcánicas para el periodo histórico en la zona volcánica Michoacán-Guanajuato: el volcán Jorullo (1759-1774) aproximadamente a 50 km hacia el sur de la cuenca y el volcán Parícutin (1943-1952), aproximadamente a 60 km al oeste.

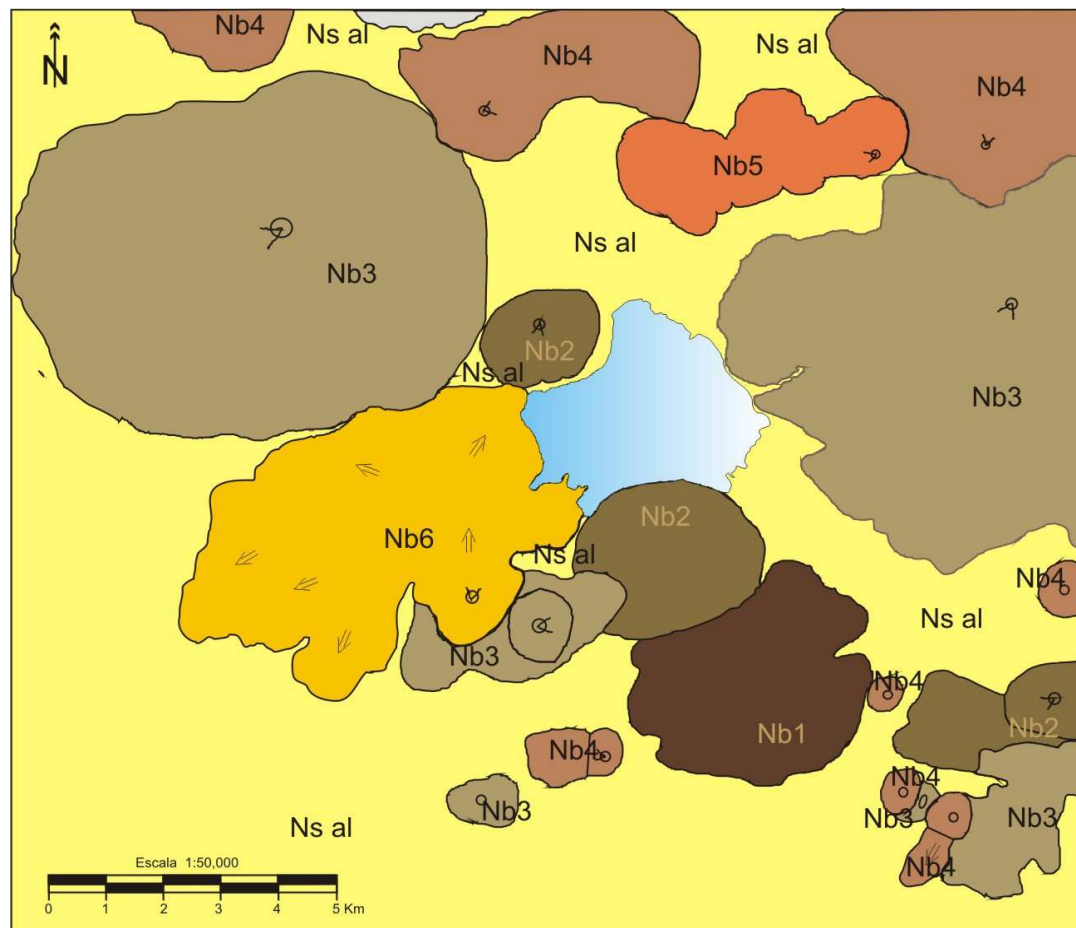


Figura 3. Mapa geológico de la región circundante al lago de Zirahuén. Las unidades aflorantes son de edad Neógena (N) y se encuentran numeradas de acuerdo a su edad relativa; Nb1 para la más antigua y Nb6 para la más joven. Nb representa rocas Neógenas de composición basáltica y Ns-al representa los depósitos aluviales y suelos (Tomado de Vázquez, en preparación).

Suelos

Los suelos de la cuenca se originaron recientemente a partir de rocas y cenizas volcánicas. En su mayor extensión corresponden a Andosoles que son arcillosos y por lo general rojizos, presentes en sierras, mesetas y lomeríos. En el área se distinguen tres subtipos: Andosol ócrico, húmico y mólico. Además, en menores proporciones se presentan el Acrisol órtico, Cambisol dístico, Feozem y Luvisol crómico (Chacón y Múzquiz, 1991).

Limnología e Hidrología

El lago de Zirahuén ha sido sujeto de numerosos estudios limnológicos (Bernal-Brooks, 1998; Chacón y Muzquiz, 1991; Chacón y Rosas-Monge, 1998; Bernal-Brooks y MacCrimmon, 2000a, b; Tavera y Martínez-Almeida, 2005). Recibe agua principalmente del río de La Palma (también conocido como río El Silencio), el cual fluye desde el este de la cuenca al oeste; a través de los pueblos de Santa Clara (también conocida como Villa Escalante) y Opopeo (Figura 1). Además, durante la estación húmeda, la corriente efímera arroyo Zirahuén, provee más influjo de agua al lago (Davies *et al.*, 2004). En adición, existen otras corrientes intermitentes de segundo y tercer orden en zonas de pendientes poco pronunciadas (Rosas, 1997).

Actualmente el lago tiene una forma pentagonal un área de 10.48 km² y un volumen de 216 Hm³. Presenta un máximo de profundidad de aproximadamente 40 m (Bernal-Brooks y MacCrimmon, 2000a), comparado con un máximo de 46 m registrado en 1942 (De Buen, 1943). Una pequeña subcuenca conocida como el Rincón Agua Verde está localizada en la esquina suroeste del lago (Figura, 1). Ésta se encuentra separada de la cuenca principal mediante una barrera rocosa que se levanta aproximadamente a 4 m por debajo de la superficie del agua. Bernal-Brooks y MacCrimmon (2000a) sugieren que una combinación de la disminución de los niveles lacustres controlados por el clima y el incremento del aporte de sedimento dentro de la cuenca fueron los factores responsables de la reducción de la profundidad del lago durante los últimos 60 años.

Zirahuén es un lago cálido monomítico que se estratifica entre los meses de abril y octubre; además, Tavera y Martínez-Almeida (2005) mencionan que Zirahuén presenta durante el verano un fenómeno de atelomixis parcial en el cual existe una pérdida de temperatura superficial durante la noche lo cual da origen a varias masas de agua de diferentes densidades que por movimientos de convección se mezclan en el epilimnion. La temperatura en el epilimnion va de 18.5 a 22.5 °C y el oxígeno disuelto varía de 4.1 a 7.5 mg/l; mientras que en el hipolimnion varía de 16.5 a 19.0 °C y el oxígeno disuelto de 2.5 a 0 mg/l (Bernal-Brooks y MacCrimmon, 2000b-B-). En 1997, el lago tenía un pH de 8.4 y una conductividad eléctrica de 119 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (Davies *et al.*, 2002).

Estudios previos han clasificado a Zirahuén como un lago oligotrófico (Chacón y Muzquiz, 1991) y oligomesotrófico (Bernal-Brooks y MaCrimmon, 2000b). Monitoreos limnológicos han indicado una tendencia ligera hacia la eutroficación durante los últimos 15 años aunque el lago actualmente conserva su apariencia de agua clara y azulada (Davies *et al.*, 2004). Entre 1987 y 1996, los valores de nitrógeno inorgánico total y fósforo total incrementaron en un 45 y 36% respectivamente, mientras que la transparencia del lago decreció un 50% hasta aproximadamente 3 m (Bernal-Brooks y MaCrimmon, 2000b).

Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por García (1973), el clima es clasificado como Cw (w2) (w)i, templado subhúmedo con lluvia en verano (Alvarado, 2003). El rango de temperatura va de 32 °C en mayo a 0°C en invierno y la temperatura media anual registrada de 1971-1992 es de 16.1 °C (Bernal-Brooks y MaCrimmon, 2000b). Por otro lado, la precipitación es, altamente estacional, con más del 95% de la precipitación anual total entre los meses de junio y septiembre (Chacón y Múzquiz, 1991). La precipitación media anual registrada de 1971-1992 fue de 1, 234 mm/año (Bernal-Brooks y MaCrimmon, 2000b).

Vegetación

En la cuenca del lago de Zirahuén se presentan seis tipos principales de vegetación (Figura 4): bosque de encino, bosque de coníferas, bosque mesófilo de montaña, pastizal, vegetación riparia y vegetación acuática. De éstos, los más extensos son los bosques de coníferas y los de encino. Por el contrario, el bosque mesófilo de montaña ocupa una superficie reducida (Pérez-Calix, 1996). La composición florística y la estructura de las comunidades no es homogénea, sino que varía de un sitio a otro en función de las condiciones ambientales locales. A continuación se da la descripción de los tipos de vegetación; las diferentes especies que conforman cada tipo de vegetación, se encuentran enlistados en los anexos de vegetación de este trabajo.

Bosque de encino

El bosque de encino o *Quercus* se localiza en la mitad occidental de la cuenca, en áreas con topografía accidentada, entre las cotas altitudinales de 2,080 y 2,500 m. Se desarrolla sobre todos los tipos de roca así como en las diferentes variedades de suelo, con excepción de los de origen aluvial. Este tipo de bosque es siempre verde a pesar de que algunos de sus componentes son árboles caducifolios. La floración de los árboles es fuertemente estacional, con un pico marcado en las interfases de sequía-lluvias. Estructuralmente, en las áreas mejor conservadas, los encinares se presentan como bosques densos, con un dosel superior de cobertura cerca a

80%, lo que ocasiona un efecto de penumbra en los niveles inferiores. Este tipo de bosque se encuentra dividido en los siguientes estratos:

Estrato arbóreo: dividido en dos zonas: (a) un estrato arbóreo superior que rebasa los 20 m de altura; llegando a presentar elementos con una altura cercana a los 30 m y (b) un estrato arbóreo inferior está formado por un grupo de árboles cuya altura varía de aproximadamente 8 a 20 m; los elementos principales de esta región se mencionan en los anexos de vegetación de este trabajo.

Estrato arbustivo: aunque se observan en toda la comunidad, está mejor desarrollado (al igual que el herbáceo) en las áreas abiertas del bosque y su altura es menor de 5 m.

Estrato herbáceo: está representado por especies anuales, bianuales y perennes. Pérez-Calix (1996) reporta 150 especies para este estrato cuyas familias mejor representadas son: Compositae, Leguminosae y Graminae, entre otras. Algunos ejemplos de éstas, se encuentran citadas en los anexos.

Además, la humedad ambiental y las características de los encinos como hospederos se conjugan en este tipo de bosque para presentar un alto número de epífitas, de trepadoras leñosas y de herbáceas altas.

Finalmente, en los encinares es frecuente encontrar plantas hemiparásitas en las ramas de los árboles. Un ejemplo a este los constituyen las especies *Cladocolea microphylla* y *Phoradendrom velutinum*, así como *Conopholis alpina*; especie parásita de las raíces de *Quercus* spp. En adición, los hongos del grupo de los macromicetos, son elementos destacados en esta comunidad. Díaz-Barriga et al. (1988), citan géneros de los bosques de encino-pino del la cuenca de Zirahuén, entre los cuales se encuentran algunos ejemplos citados en el anexo I.

Bosques de coníferas

En Zirahuén este tipo de bosques están conformados por bosques de pino y bosques de *Abies* descritos a continuación:

Bosque de *Pinus*. Se presentan principalmente en la mitad oriental de la cuenca en los cerros El Frijol, Aguacate, Cantón y Morillo, así como en la parte alta del cerro Zirahuén; en altitudes de 2, 100 a 3, 000 m. Se establece en las laderas menos protegidas de la insolación. Los suelos en que se presentan son andosoles, los cuales se caracterizan por ser profundos y por

presentar un buen drenaje. Las rocas sobre las cuales se desarrollan los bosques de pino son basaltos y brechas volcánicas.

Los pinares forman una comunidad arbórea de hasta 30 m de altura; sus troncos son altos, rectos y se ramifican en la parte superior. Son comunidades siempre verdes, condición determinada por la permanencia de las hojas de los pinos, sin embargo, la presencia de árboles de otras familias a menudo le da al bosque una apariencia más o menos caducifolia.

La especie más ampliamente distribuida es *Pinus pseudostrobus*, la que en los cerros El Frijol y Zirahuén (2,500-3,000 m.s.n.m.), forma masas casi puras, pero acompañada en ocasiones con *Quercus laurina*, *Q. rugosa*, *Arbustus xalapensis* y otros árboles. En altitudes de 2,100 a 2,300 m, *Pinus pseudostrobus* se asocia con *P. leiophylla* y *P. michoacana*. El sotobosque de los pinares, cuando son comunidades cerradas, es pobre. Es posible apreciar un estrato arbustivo y uno herbáceo; de los cuales en el herbáceo, las gramíneas juegan el papel más destacado. En general, el estrato herbáceo no abarca mucha superficie, aunque es más denso en las áreas de claros del bosque. Las especies observadas con mayor frecuencia de ambos estratos se enlistan en el anexo II de este trabajo. En este tipo de bosque no se presentan especies trepadoras y de las epífitas las únicas reportadas por Pérez-Calix (1996) son *Tillandsia cossonii* y *Tillandsia prodigiosa*.

Algunas áreas que probablemente presentaban en el pasado bosque mixto de pino-encino, y en las que los incendios son frecuentes, en la actualidad están ocupadas por *Pinus leiophylla*, mientras que en aquellas áreas que fueron cultivadas y han sido abandonadas se desarrolla un bosque cerrado y alto de *Pinus pseudostrobus*, como sucede en Cungo, al sur de Santa Clara del Cobre. En adición, algunas localidades en que el bosque de pino o el de pino-encino ha desaparecido por completo, se desarrolla un matorral compuesto por arbustos como *Baccharis heterophylla*, *Brickellia pendula*, *Eupatorium areolare*, *Eupatorium glabratum*, *Loeselia mexicana*, *Salvia microphylla*, *Senecio salignus*, *Stevia subpubescens* y algunas hierbas anuales y perennes (algunos ejemplos se observan en el anexo II).

Bosque de *Abies*. Esta comunidad se ubica en la porción oriental de la cuenca, en los cerros La Tapada, Janamo y Burro, en altitudes de 2,800 a 3,300 m. Los sitios en que se presenta son de preferencia cañadas y laderas húmedas protegidas de la acción directa de los vientos, con una precipitación superior a 1,200 mm anuales, porque es considerada como una comunidad mesófila. Los suelos en los cuales se desarrolla el bosque de *Abies*, son suelos bien drenados y ricos en materia orgánica. La litología superficial corresponde a dacitas y basaltos.

La especie de oyamel que se ha observado en esta área es *Abies religiosa* la cual está representada por árboles altos, a veces mayores de 30 m, con un diámetro de tronco de hasta un metro. En los sitios en que *Abies religiosa* crece en masas forma un bosque denso, en el cual las copas de los árboles están muy juntas y mantienen una cobertura cercana al 100%, lo que ocasiona cierta penumbra en los niveles inferiores; la falta de luz limita el crecimiento denso de plantas herbáceas y arbustivas. Sin embargo, lo típico en la cuenca de Zirahuén es que debido a lo accidentado del terreno, a la abundancia de los afloramientos rocosos y de suelos someros y, en gran medida, a la tala en la que están siendo sometidos estos bosques, se presenten como masas abiertas que permiten la entrada de luz favoreciendo el desarrollo del sotobosque. Fenológicamente el bosque de *Abies* es una comunidad siempre verde ya que tiene hojas durante todo el año. La floración de las especies arbóreas y arbustivas se realiza durante la época seca y fría del año (finales de noviembre a marzo).

En este tipo de bosque *Abies religiosa*, se combina con *Pinus montezumae*, *Pinus pseudostrobus*, *Quercus laurina* y *Quercus rugosa* para formar un estrato arbóreo superior. Por otro lado, es posible observar otro estrato de árboles de menos altura (5-15 m) conformado principalmente por *Alnus jorullensis*, *Arbustus xalapensis*, *Buddleia cordata*, *Clethra mexicana*, *Garrya laurifolia* y *Salix paradoxa*.

Además se presenta un estrato arbustivo, con alturas que van de 1 a 3 m así como uno herbáceo cuyos elementos más característicos se encuentran enlistados en el anexo III.

Por otro lado, a ras del suelo se desarrolla un estrato que generalmente no es superior a 15 cm de altura, constituido principalmente por una capa húmeda de musgo. Las condiciones de humedad edáfica permiten el crecimiento de algunas especies de fanerógamas pequeñas o rastreras que soportan la penumbra que se presentan en este nivel. Entre las especies mejor representadas destacan las mencionadas en el anexo III.

Los elementos epífitos están representados por varias especies de líquenes que crecen sobre los troncos y ramas de los árboles. Se encuentra además en esta comunidad como hemiparásito *Arceuthobium globosum*, sobre individuos jóvenes o débiles de *Pinus* sp. Las trepadoras son más bien escasas y se localizan en sitios donde los encinos tienden a dominar; las más comunes son *Archibaccharis hirtella* y *Microsechium helleri*, pero en el Cerro La Tapada, *Salvia gesneriflora* se comporta como trepadora, sobre árboles de *Garrya laurifolia*. Por otro lado, se ha observado en esta comunidad la presencia de algunas parásitas como *Monotropa hypopithys* y *M. uniflora*.

Las localidades con bosque de oyamel, por lo general muestran una serie una serie de claros en los que la presencia de árboles es muy escasa, lo que permite el desarrollo de matorrales y pastizales, dependiendo de las características del suelo, así como de las condiciones topográficas. De esta forma, en áreas donde el suelo es somero y las pendientes pronunciadas, el matorral comprende especies de hábitos rupícolas, entre las que resaltan las citadas en el anexo III.

Otro tipo de matorral más o menos definido, se desarrolla en zonas que han sido perturbadas y en donde los suelos son más profundos; tal comunidad secundaria está compuesta principalmente por las especies citadas en el anexo III.

Finalmente, algunos individuos aislados de oyamel se localizan en áreas cercanas a San Gregorio y La Palma, formando asociaciones con *Pinus* y *Quercus*, lo que puede indicar que los bosques de *Abies* tenían una distribución más amplia en el pasado y debido a la deforestación se han restringido notablemente a las áreas mencionadas.

Bosque mesófilo de montaña

Esta comunidad se presenta mejor definido en la localidad denominada Rincón de Agua Verde, así como en algunas cañadas del Cerro Zirahuén, aunque en esta última habita superficies muy reducidas. El bosque mesófilo de montaña se establece entre 2,080 y 2,300 msnm., piso altitudinal que coincide con el bosque de pino-encino, pero en donde la humedad de la atmósfera es más elevada, debido a la protección de las cañadas. Los suelos que ocupa son de tipo Andosol y la litología superficial está constituida por rocas basálticas.

El bosque mesófilo de montaña se presenta como una comunidad densa en los sitios poco perturbados. El estrato arbóreo está dividido en dos; uno donde los árboles dominantes son por lo general caducifolios con alturas que rebasan los 20 m, y otro donde presentan aproximadamente 12 m de altura. Este segundo estrato se encuentra asociado a un grupo de arbustos de casi 8 m de altura. Entre los elementos más frecuentes del estrato arbóreo se encuentran los citados en el anexo IV. Además se observa un estrato arbustivo y de plantas sufrútices así como un estrato herbáceo rico en especies y de alta diversidad debido por un lado al disturbio ejercido sobre esta comunidad, y por el otro a la humedad del medio; entre los elementos más comunes dichos estratos se encuentran los citados en el anexo IV.

En adición de los estratos mencionados existe dentro de este bosque plantas trepadoras y plantas epífitas, las cuales por lo general son abundantes. Entre estas comunidades de plantas se tienen las enlistadas en el anexo IV.

Finalmente, algunos elementos florísticos propios del bosque mesófilo de montaña se encuentran representados en el bosque de encino. La distribución actual de tales componentes en otras comunidades de la cuenca podría ser indicadora de que este tipo de vegetación en otras épocas ocupaba un área más amplia, misma que se ha reducido en función de cambios climáticos, permaneciendo solamente en algunas cañadas en que se conservaron las condiciones de humedad y temperatura necesarias para su existencia.

En la actualidad el bosque mesófilo de montaña se encuentra muy perturbado y está en peligro de desaparecer, no obstante que el rodal cercano a Agua Verde es considerado por los lugareños como área protegida.

Pastizales

Se conoce como pastizal a la vegetación en la que las gramíneas constituyen el elemento estructural más importante. En la cuenca del lago de Zirahuén el pastizal está pobremente representado, encontrándose de forma natural en la cima de los cerros más altos, así como en sitios planos con drenaje deficiente. Prospera de preferencia sobre suelos de tipo Feozem, los cuales se caracterizan por presentar una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y nutrientes; en algunos sitios se pueden localizar horizontes endurecidos ferruginosos a poca o mediana profundidad.

En la cuenca se observan dos tipos de pastizales fisionómicamente diferentes:

Pastizal A. Desarrollado en la parte alta del cerro Burro a 3,300 msnm.; formado por gramíneas amacolladas de más o menos un metro de alto en donde es dominante *Muhlenbergia gigantea*, especie que forma densas colonias con coberturas cercanas al 100%. Otras gramíneas asociadas son: *Agrostis toluensis*, *Bromus carinatus* y *Festuca amplissima*. En esta comunidad se ha colectado además otras especies de porte herbáceo enlistadas en el anexo V.

Pastizal B. Desarrollado en las orillas de la Lagunita de San Gregorio a 2,700 m.s.n.m.; se presenta fisionómicamente como una carpeta de gramíneas perennes de poca altura (40-60 cm). La densidad de la cubierta vegetal es variable dependiendo principalmente de la humedad del suelo. En general, los zacates amacollados están muy separados entre sí, sin llegar a formar colonias densas; entre las gramíneas más comunes en este pastizal se hallan en el anexo V. Además, es frecuente encontrar una alta diversidad de herbáceas y sufrútices de talla variable, cuya presencia da una apariencia más densa al pastizal; esta característica es más notoria en la época lluviosa en la que crecen y florecen las plantas anuales. Algunas de las especies más comunes se enlistan en el mismo anexo.

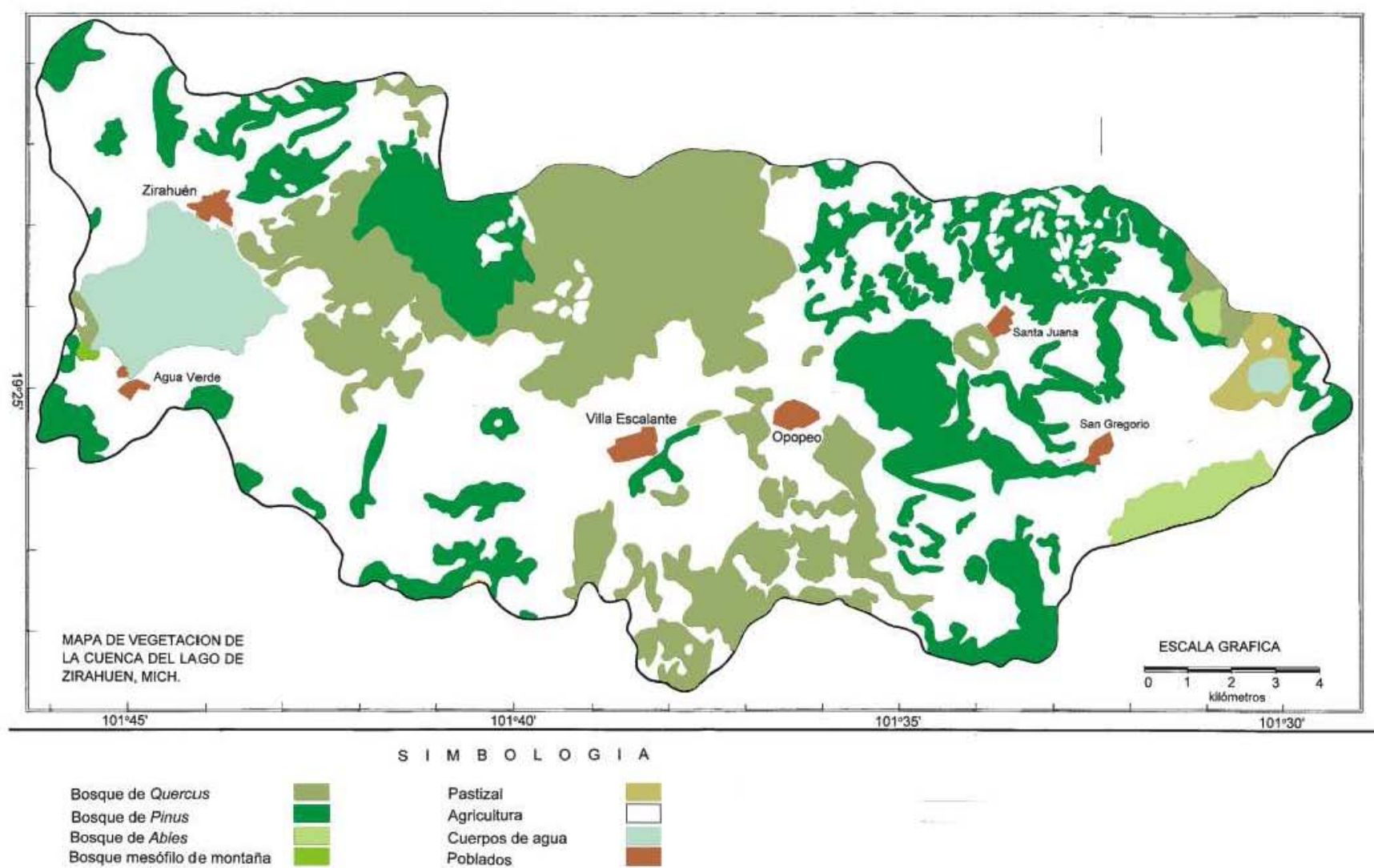


Figura 4. Mapa general de la vegetación regional de la cuenca de Zirahuén. Se presenta la distribución actual de los tipos de bosque y de la vegetación pastizal (modificado de Pérez-Cálix, 1996).

Vegetación Riparia

En la ribera occidental del lago de Zirahuén existe una franja muy angosta, que es constantemente bañada por el oleaje, por lo cual, la humedad en el sustrato es permanente. En la localidad se desarrolla una comunidad leñosa, formada principalmente por árboles de 8 a 12 m de altura, entre los que destacan: *Alnus acuminata* ssp. *arguta*, *Podachaenium eminens* y *Salix bonplandiana*. En este sitio las trepadoras son abundantes, estando representadas por las siguientes especies: *Clematis dioica*, *Rubus liebmannii*, *Smilax moranensis*, *Smilax pringlei*, *Solanum appendiculatum* y *Vitis bourgaeana*. Las especies arbustivas y herbáceas son escasas o están ausentes; las más comunes son: *Borreira laevis*, *Calceolaria* sp., *Mimulus glabratus*, *Peperomia* sp., *Phenax hirtus* y *Pteridium feei*.

Por otra parte, en los márgenes de algunos arroyos se aprecian hileras de *Salix bonplandiana*, además de un conjunto de arbustos y de herbáceas anuales o perennes, como por ejemplo: *Athyrium arcuatum*, *Buddleia parviflora*, *Crusera longiflora*, *Cuphea bustamanta*, *Cuphea jorullensis*, *Dryopteris karwinskiana*, *Equisetum hyemale*, *Lepidium schaffneri*, *Senecio barab-johannis* y *Woodwardia spinulosa*.

Vegetación acuática

La vegetación acuática (Madrigal-Guridi *et al.*, 2004) se presentan de manera heterogénea a lo largo de la zona litoral, siendo las comunidades próximas a la desembocadura del río La Palma las que muestran cambios más drásticos con relación a su estructura y composición, consecuencia de la escasa pendiente y las marcadas variaciones en el límite de la línea de costa y el nivel del lago en las diferentes estaciones del año. Por sus características hidrológicas la cuenca del lago de Zirahuén presenta comunidades vegetales de tipo acuático y semiacuático. De acuerdo a Madrigal-Guridi *et al.* (2004) y a Pérez-Cálix (1996), la vegetación acuática del lago de Zirahuén está dividida en 5 formas de vida (hidrófitas enraizadas emergentes, hidrófitas enraizadas sumergidas, hidrófitas enraizadas de hojas flotantes, hidrófitas libremente sumergidas e hidrófitas libres flotadoras). De manrea general a continuación se presentan una descripción tanto de los tipos como de las formas de vida:

Hidrófitas enraizadas emergentes: plantas enraizadas en el sedimento del lago, pero gran parte de sus tallos, hojas y estructuras sexuales se mantienen por encima de la superficie del agua. En Zirahuén estas comunidades presentan una distribución restringida principalmente a la zona sur y oriente del lago, en comunidades de mediana extensión formando manchones en las orillas del lago y ocupan desde porciones muy someras, con suelo casi seco, hasta áreas con profundidades cerca a 4 m. Los elementos principales de estas comunidades son: *Cyperus canus*, *Cyperus hermaphroditus*, *Cyperus prolixus*, *Typha latifolia*, *T. domingensis*, y

Schoenoplectus californicus, con alturas promedio de 2.5 m, en zonas de hasta 2 m de profundidad como máximo. Las zonas más extensas del tular durante la estación seca pueden quedar temporalmente fuera del agua y con frecuencia se encuentran en convivencia con vegetación subacuática. Asociadas al tular, en lugares abiertos, crecen especies de menor talla y con diferente forma de vida, principalmente hidrófitas enraizadas sumergidas como *Potamogeton illinoensis*, *Ludwigia palustris*, y *Najas guadalupensis*. Particularmente, en la zona sureste se desarrollan las hidrófitas de hojas flotantes *Nymphaea odorata* y *Nymphoides fallax*.

Hidrófitas enraizadas sumergidas: dentro de esta forma de vida quedan incluidas todas las especies cuyas estructuras foliares y reproductoras permanecen completamente sumergidas, aunque en algunos casos pueden tener sus órganos reproductores aéreos, emergiendo por encima de la superficie o ser flotantes. Esta comunidad forma una franja que rodea el lago, en aguas someras que no rebasan los 5 m de profundidad. Su presencia está determinada por la transparencia del agua, siendo notoria su falta en áreas donde abundan partículas en suspensión, como ocurre en las cercanías de la población de Zirahuén y la porción contigua al cerro Colorado. Entre las especies sumergidas más comunes se encuentran las siguientes: *Potamogeton illinoensis*, *Potamogeton foliosus* var. *foliosus*, *Ceratophyllum* sp., *Myriophyllum* sp., *Najas guadalupensis* y las algas *Chara excelsa* y *Nitella opaca*. La escasa extensión de la zona litoral, determinada por la pendiente pronunciada en la mayor parte de las orillas del lago, ocasiona que las comunidades de hidrófitas con esta forma de vida, se presenten a manera de una franja angosta a lo largo de la orilla. Las especies citadas se encuentran desde 0.5 m de profundidad hasta zonas de 8 a 9 m; aunque en algunos casos se pueden observar individuos aislados de *Nitella opaca* hasta los 12 m de profundidad durante la estación seca, cuando la transparencia del agua es mayor. Las comunidades de esta forma de vida están bien representadas a lo largo de la zona litoral de todo el lago, con excepción de la zona sureste, en la que el sustrato es predominantemente rocoso y la vegetación únicamente puede desarrollarse en sitios muy reducidos. Además, es común encontrar áreas donde el predominio de una especie es muy marcado con respecto a las otras, existiendo comunidades dominadas casi en su totalidad por *Potamogeton illinoensis*, *Chara excelsa* o *Nitella opaca*.

Hidrófitas enraizadas de hojas flotantes: son plantas enraizadas al sustrato, cuyas hojas flotan sobre la superficie del agua y sus órganos reproductores emergen por encima de la misma. Las hidrófitas que poseen esta forma de vida únicamente se encuentran bien representadas en las áreas protegidas de la zona sur y sureste del lago de Zirahuén, en áreas de escasa pendiente, en medio de los tulares o en sus márgenes, a profundidades inferiores a 1.5 m y en manchones de extensión reducida. Las especies que se observan son *Nymphaea odorata* y

Nymphoides fallax. Asociadas a ellas se encuentran algunas hidrófitas enraizadas emergentes de las especies *Schoenoplectus californicus* y *Typha* spp., así como algunas hidrófitas enraizadas sumergidas tales como *Ludwigia palustris* y *Potamogeton illinoensis*.

Hidrófitas libremente sumergidas: actualmente sólo se encuentra una sola especie con esta forma de vida, *Utricularia* aff. *macrorhiza*. Se localiza exclusivamente en zonas protegidas al sur del lago y poco profundas (2-3 m). Es poco abundante, aunque algunos individuos pueden alcanzar tallas mayores a 1.5 m. Las plantas crecen postradas libremente sobre el sustrato o sobre otras plantas acuáticas.

Hidrófita libre flotadora: sus estructuras vegetativas y reproductoras se mantienen emergidas y únicamente su sistema radical se encuentra sumergido. Son dispersadas libremente por la acción de los vientos y corrientes.

Las hidrófitas del lago de Zirahuén presentan una zonificación definida principalmente por la profundidad. Las más abundantes y que ocupan mayor superficie son las hidrófitas acuáticas y subacuáticas. Colindan con ellas zonas de inundación temporal que corresponden al bosque mesófilo de montaña. Por otro lado, los individuos que conforman el grupo de plantas tolerantes se localizan generalmente en las orillas del lago; en su mayoría presentan formas biológicas herbáceas y arbustivas.

Existen además un grupo de especies anfibas arraigadas, en su mayoría de talla pequeña, pero algunas pueden alcanzar tamaños de hasta 1 o 2 m. Dentro de este grupo se encuentran: *Aster subulatus*, *Athyrium arcuatum*, *Bacopa monnieri*, *Berula erecta*, *Bidens aurea*, *Cerastium nutans*, *Hydrocotyle umbellata*, *Isoetes* sp. (reportado por Pérez-Cálix, 1996), *Isoetes echinospora* (reportado por Madrigal *et al.*, 2004) *Polygonum* spp., *Rorippa mexicana*, *Sagittaria latifolia*, *Sagittaria macrophylla* y *Utricularia lívida*.

Arqueología

Las primeras evidencias (antes de 2500 años AC) de presencia humana en Michoacán procede de puntas de flecha y otros implementos de piedra en asociación con restos de megafauna (Oliveros, 1975). La cuenca de Zirahuén se encuentra cerca de la capital del imperio Purépecha (o Tarasco) (Postclásico AD 1300-1521) que era Tzintzuntzan. Esta ciudad estaba localizada en la orilla del lago de Pátzcuaro, aproximadamente a 15 km hacia el norte de Zirahuén. De acuerdo con la *Relación de Michoacán*, que es el primer documento etnográfico

para la región, y fue escrito en 1541, la tierra alrededor del lago era utilizada por los Purépechas de la nobleza con fines ceremoniales y recreacionales (Davies *et al.*, 2004).

Para el Preclásico se identificaron tres culturas en Michoacán: Chupícuaro, Chumbícuaro y la Balsas-Mezcala. Durante el Clásico, (1-1000 años DC) se han documentado varias zonas de ocupación en Michoacán, destacando por su arquitectura pública la de Loma Alta en la cuenca de Zacapu y la de Chehuayo en Cuitzeo. Pero es hacia los años 400-900 DC que se da una transformación importante en la cultura de Michoacán, así como el inicio del imperio Tarasco cuyo apogeo sucede entre los años 1450 hasta la llegada de los españoles.

La evidencia palinológica en los sedimentos de Zirahuén, indica que la actividad de agricultura alrededor de la cuenca se ha llevado a cabo durante los últimos 3 000 años (Lozano *et al.*, en prensa). Por otro lado, las evidencias arqueológicas de la ocupación dentro de la cuenca de Zirahuén son escasas. Sin embargo, el descubrimiento de artefactos indica que la cuenca estuvo ocupada durante el Postclásico (Pulido *et al.*, 1996). Por otro lado, se tiene una descripción de 1619 acerca de la deforestación en la cuenca (Expediente 7 AGN Tierras 3695). Durante el siglo XVIII se llevó a cabo un incremento en el número de establecimientos hispánicos y la explotación de la cuenca; a mediados de 1700s, se había establecido un gran número de estados privados llamados “haciendas” donde establecieron el cultivo de azúcar, maíz y trigo además de la introducción de ganado (Endfield y O’Hara, 1999).

Metodología

Método de campo

El núcleo ZIR03-I (6.61 m de longitud) fue recolectado durante la temporada de campo llevada a cabo en la primavera del 2003 en la zona norte (a 12 metros de profundidad) ($19^{\circ} 27.121$ N y $101^{\circ} 44.678$ W) del lago de Zirahuén, Michoacán (Figura 5). Para la extracción de los sedimentos se utilizó un nucleador de pistón Usinger (Mingram *et al.*, 2007) con diámetros internos de 8 y 5 cm. Los tramos de núcleo extraídos se trasladaron al laboratorio donde se colocaron en tubos PVC y en bolsas de plástico. Posteriormente todas las secciones del núcleo fueron divididas, descritas y fotografiados.

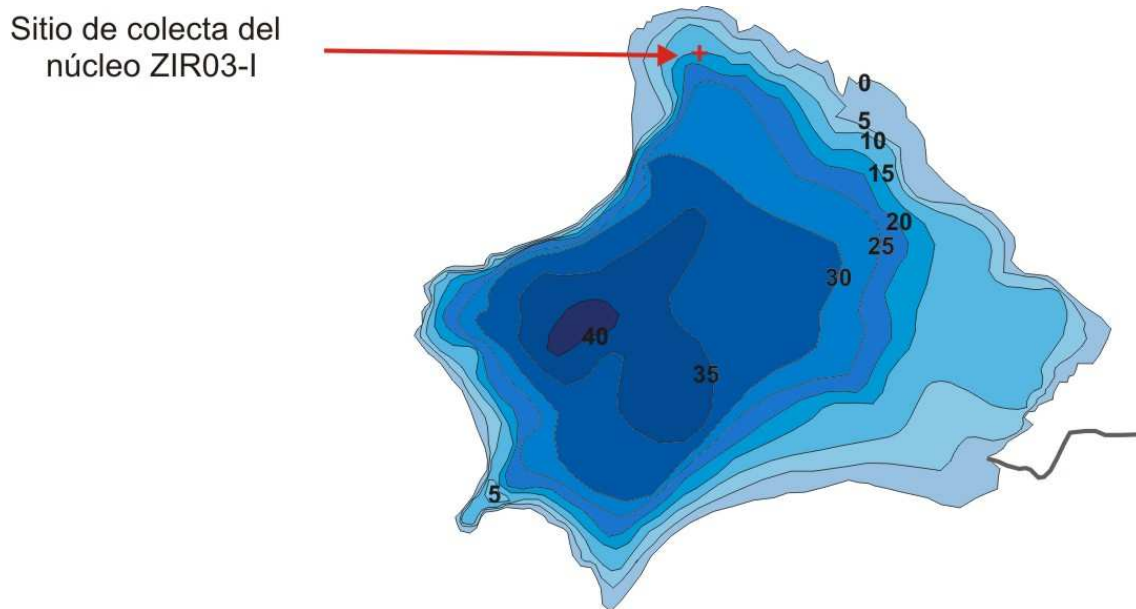


Figura 5. Sitio de colecta del núcleo ZIR03-I. Se ilustra también la batimetría obtenida por Ordoñez *et al.*, (1982).

Método de laboratorio

Los datos presentados en este trabajo acerca de la litoestratigrafía, de la geocronología así como de los análisis de los componentes clásticos, biogénicos, susceptibilidad magnética y elementos selectos de la secuencia sedimentaria ZIR03-I fueron realizados por la Dra. Beatriz Ortega-Guerrero y por el M. en C. Gabriel Vázquez del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Además, el análisis de asociación de diatomeas citado en este trabajo fue llevado a cabo por la Dra. Isabel Israde Alcántara del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Para ver detalles acerca de los procesos de laboratorio empleados para cada uno de estos tipos de análisis ver (Ortega-Guerrero *et al.*, en revisión).

Procesamiento de muestras para la extracción de polen

Muestreo

El muestreo se llevó a cabo en los 5 tramos del núcleo mediante el empleo de muestreadores de 1 cm³. Éste se llevó a cabo, en su mayor parte, a intervalos de 5 cm, con excepción de los primeros 2 tramos los cuales estaban muy perturbados y fue tomado en los lugares donde el núcleo presentaba menos daño. En total se obtuvieron 128 muestras las cuales fueron divididas en series de 4 para el proceso de extracción.

Método de extracción de los palinomorfos

Se utilizó una pastilla marcadora de *Lycopodium clavatum* Lote 938934 (la cual sirvió para calcular los valores de concentración de polen) por cada cm³ de muestra de sedimento. A cada muestra se agregó HCl al 10 % (aproximadamente 6ml) para la eliminación de carbonatos y KOH al 10% (aprox. 6 ml) para la eliminación de la materia orgánica. Con la adición de cada ácido las muestras fueron puestas a baño María durante 13', agitadas y neutralizadas. Posteriormente, se tamizaron con una malla #80 y se les agregó HF al 48% para eliminar silicatos dejándose reposar durante 24hrs. Pasado este tiempo, fueron lavadas con agua destilada, HCl-1N, y neutralizadas. Finalmente, se les agregó Hipoclorito de sodio al 3% y se tiñeron con safranina para su posterior montaje.

Montaje

Se llevaron a cabo 2 tipos de montaje: uno en gelatina glicerina y otro en aceite de silicón. Se hicieron 4 preparaciones por cada muestra en gelatina glicerina y el material restante fue montado en aceite de silicón después de haber sido deshidratado con alcohol terbutílico obteniéndose un total de 512 preparaciones en gelatina glicerina y 225 preparaciones en aceite de silicón.

Identificación y conteo de los palinomorfos

La identificación y el conteo de los palinomorfos se llevó a cabo bajo el microscopio óptico Olympus BH2. En cuanto al conteo de los palinomorfos se contaron de 350 a 500 granos de polen por preparación considerando que estos números como significativos. Posteriormente, el conjunto palinológico obtenido a partir del conteo se agrupó de acuerdo a la forma de vida de cada taxón, y a partir de éstos, se determinaron las sumas polínicas, la cuales fueron organizadas en polen arbóreo, polen herbáceo, pteridofitas, vegetación acuática, algas, hongos, cladóceros y quiromínidos.

Diagramas palinológicos y análisis estadísticos de datos

Los datos palinológicos (Figuras 9-11) fueron analizados y graficados mediante el uso del programa TILIA 2.1 (Grimm, 1991-1993). Este software es un paquete que permite manejar, analizar y graficar datos palinológicos debido a su capacidad de elaborar sumas palinológicas y porcentajes basados en las sumas polínicas. Además, este programa permite generar datos de concentración de polen, tasas de acumulación polínica y establecer zonas palinológicas con una edad determinada la cual es asignada a partir de la interpolación y de la extrapolación de fechamientos.

Los porcentajes de árboles, hierbas y pteridofitas se calcularon tomando en cuenta la suma polínica básica para los tres grupos (suma de árboles, suma de hierbas y suma de pteridofitas = ΣP). El porcentaje de la vegetación acuática y de las algas se obtuvo con base a su misma suma mientras que las fungoesporas, los cladóceros y los quirominidos se dejaron como conteos absolutos.

Los porcentajes son numéricamente dependientes ya que ellos deben sumar 100 por lo cual el incremento en el porcentaje de polen de un taxón debe estar siempre acompañado del decremento de otro (Prentice, 1988). Los porcentajes pueden reflejar la proporción de las especies presentes en la vegetación en el área en el tiempo durante el cual los sedimentos fueron depositados (Davis, 1963).

La concentración polínica es una medida que estima la cantidad de palinomorfos por unidad de volumen o de masa de sedimento húmedo o seco, expresada como número de granos de polen por cm^3 . Estos datos ofrecen información paleoecológica acerca de los cambios en la redeposición o sedimentación de la cuenca. Por otro lado, la tasa de acumulación polínica (también conocida como flujo polínico o tasa de depositación polínica) es el número total de granos acumulados por unidad de área de sedimentación por unidad de tiempo (expresado como No. de granos/ $\text{cm}^2/\text{año}$) y, proporciona información acerca de la abundancia de cada taxón. Los

valores de acumulación son calculados a partir de la concentración de polen en el sedimento, mientras que el tiempo por unidad de espesor o tiempo depósito, es la cantidad de tiempo por unidad de grosor de sedimento y sus unidades son cm/año (Birks y Birks, 1980).

El conteo de partículas de carbón cuantifica la acumulación de estas partículas en los sedimentos durante o posterior a un incendio el cual puede tener influencia tanto sobre la vegetación regional como en la local (Whitlock y Larsen, 2001). Así, con el objeto de identificar posibles incendios pasado se realizó el conteo de partículas de carbón mayores a $100\mu\text{m}$ de longitud en cada una de las preparaciones de polen y posteriormente se calcularon valores de concentración de partículas de carbón (No. de partículas de carbón/ cm^3) así como de acumulación (No. de partículas de carbón / $\text{cm}^2/\text{año}$).

Se definieron zonas palinológicas por medio del análisis de agrupamiento aglomerativo y jerárquico, estratigráficamente restringido (CONISS) (Grimm, 1987), incluido en el programa TILIA 2.1 (Grimm, 1991-1993). Este tipo de análisis es útil ya que representa taxa que ocurren juntos en el tiempo con patrones similares de ocurrencia a través de la secuencia. Permite reconocer cambios a través del tiempo en las diferentes comunidades vegetales pasadas a lo largo de la secuencia (Birk, 1980; Birks, 1986; Faegri & Iversen, 1989).

Análisis de Correspondencia Canónica

Con el propósito de identificar la respuesta de los taxa encontrados en el análisis palinológico a las variables estimadas que son: carbón orgánico total, carbón inorgánico, susceptibilidad magnética y concentración de partículas de carbón se llevó a cabo un Análisis de Correspondencia Canónica (ACC) que es un método utilizado para correlacionar relaciones lineales entre dos variables multidimensionales (Hardoon *et al.*, 2003). Por ser un método de ordenación directa, relaciona las distribuciones de las especies con variables ambientales y se usa frecuentemente para estudios actuales (Ter Braak, 1986). La aplicación de este análisis a estudios paleopalínológicos ofrece la posibilidad de detectar el papel de los taxones en respuesta a los factores ambientales.

El ACC genera un eje unimodal con respecto a las variables de respuesta (e.g. la ocurrencia o abundancia de las especies) y un eje linear con respecto a las variables predictoras (e.g. hábitat o características ambientales) (Gotelli y Ellison, 2004). En sí, el ACC constriñe (limita) una ordenación de una matriz por medio de una regresión lineal múltiple de las variables de otra matriz, donde la primer matriz generalmente corresponde a las abundancia de especies de los sitios de estudio, mientras que la segunda corresponde a los factores ambientales medidos en las muestras.

En este trabajo el ACC fue aplicado sobre tres matrices; dos correspondientes a los conteos de los palinomorfos (especies) terrestres y acuáticos presentes en cada una de las diferentes profundidades dadas en cm cuyas dimensiones para cada una fueron de 56x88 y la una conformada por los factores ambientales (Susceptibilidad magnética, CIT%, COT% y concentración de partículas de carbón) cuyas dimensiones son 4x88. Es importante mencionar, que a pesar de tener más variables ambientales no fue posible incluirlas debido a las diferencias en cuanto a la profundidad donde fueron tomadas las muestras, las cuales difieren de las muestras de polen, estas son mencionadas en las secciones previas y se toman en cuenta para la discusión de los resultados.

El ACC fue realizado con el software CANOCO versión 4.5. Para interpretar el ACC se utilizaron los coeficientes de correlación palinomorfos terrestres y acuáticos-variables ambientales así como la prueba de t para determinar la significancia del modelo (Tablas 3-6). Ya que los taxa terrestres y acuáticos provienen de ecosistemas diferentes se separaron con el propósito de dilucidar el posible rol ecológico de cada taxa. A continuación se presenta el análisis de los palinomorfos acuáticos y de los palinomorfos terrestres.

Resultados

Geocronología y litoestratigrafía de la secuencia lacustre ZIR03-I

El modelo de edad (Tabla 1; Figura, 6) de la secuencia sedimentaria ZIR03-I está basado en 10 fechamientos de ^{14}C los cuales fueron calibrados a años calendario utilizando el programa de calibración 5.0 (Stuiver y Reimer, 1993; Stuiver *et al.*, 2005) y con la base de datos IntCal04 (Reimer *et al.*, 2004) (Tabla 1). Asimismo, se obtuvo un modelo de edad-profundidad construido por medio de la interpolación de edades entre pares de datos adyacentes y las tasas de sedimentación lineal calculadas (Figura 6), tomando la edad de la cima del núcleo como el año 2003 por haber sido colectado en ese año. De manera general, Ortega-Guerrero *et al.*, (en revisión) definen al núcleo sedimentario ZI03-I como una secuencia formada por tres unidades estratigráficas (Figura 7) -la Unidad 3 (6.61-3.72 m; 16,820-12,100 cal AP) compuesta por limos ricos en diatomeas; la Unidad 2 (3.72-.2.57 m; 7,160-3,930 cal AP) formada por oozeos orgánicos ricos en diatomeas y la Unidad 1 (2.57-0 m; 3,930 cal AP-2003 AD) conformada por limos arcillosos cuyos sedimentos se dividen en 10 facies diferentes agrupadas en dos categorías: a) clásticas y volcanoclásticas y b) biogénicas (diatomita) las cuales se describen a continuación:

Facies clásticas (A, B, C, F) (Figura 7): son dominantes en la parte superior de la secuencia sedimentaria sobre los 3.72 m de profundidad. Incluyen sedimentos masivos a laminados arcillosos y arenosos. Las facies volcanoclásticas (T) se localizan en siete capas de manera diseminada o bien como láminas y en total constituyen <1% del grosor de la secuencia. Estos sedimentos están compuestos por minerales de arcilla, plagioclasas, biotita, cuarzo, anfíbol, minerales máficos (en su mayoría titanomagnetitas) y vidrios volcánicos con contenido variable de inclusiones de microcristales. El contenido orgánico es relativamente bajo y comprende principalmente amorfos de materia orgánica lacustre, diatomeas y ocasionalmente fitolitos, restos herbáceos y restos de carbón.

Facies biogénicas (D, G, H, I, J) (Figura 7): corresponden a oozeos de diatomeas diferenciados por el color y por el tipo de estructura que puede ser masiva o laminada. Las diatomeas son más abundantes en las facies D y E. Además se incluyen otros componentes biogénicos tales como amorfos de materia orgánica, fragmentos de plantas, fitolitos y megasporas del helecho acuático *Isöetes*, las cuales son abundantes en las facies G, H, I, y J.

Código Laboratorio	Profundidad (m)	Edad ¹⁴ C (años AP)	Años cal. AP 2σ
Beta 193855	0.50	770 ± 50	653-789
Beta 227821	0.91	1390 ± 40	1262-1377
Beta 227822	1.52	2550 ± 40	2489-2643
Beta 193856	2.32	2870 ± 40	2871-3081
Beta 195351	3.05	4910 ± 40	5589-5720
Beta 233927	3.29	5490 ± 40	6260-6352
Beta 233928	3.49	5950 ± 40	6676-6882
Beta 193857	3.73	10, 290 ± 60	11945-12248
Beta 195352	5.13	12, 850 ± 50	14947-15445
Beta 193858	6.51	13, 980 ± 80	16250-17050

Tabla 1 Fechamientos de radiocarbono por AMS del núcleo ZIR-03 y calibración con base en Stuiver y Reimer (1993); Stuiver *et al.*, (2005). Calib 5.0.1 (Modificado de Ortega-Guerrero *et al.*, en revisión).

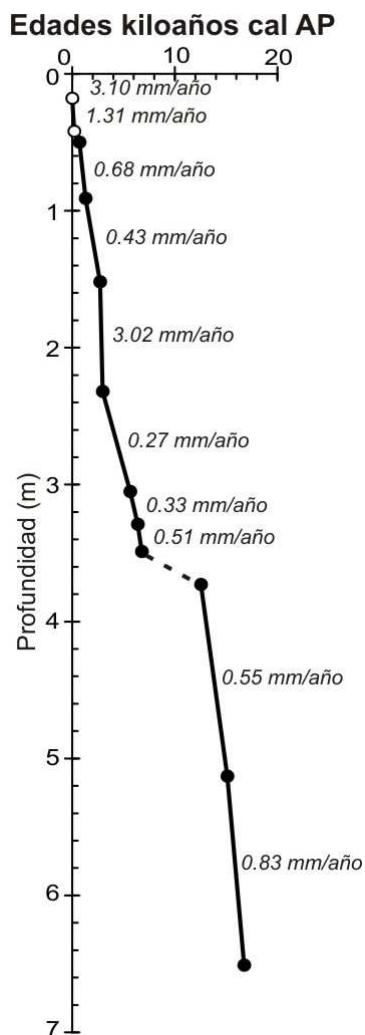


Figura 6. Modelo de edad y tasas de sedimentación obtenido para el núcleo sedimentario ZIR03.-I. Los valores utilizados para el modelo de edad (círculos negros) son el punto medio de las edades ¹⁴C calibradas con 2σ (mostradas en la tabla 1). Las edades de las tefras del Jorullo y del Parícutín se muestra en círculos blancos; además se indican las tasas de sedimentación calculadas (mm/año) (Tomado de Ortega-Guerrero *et al.*, en revisión).

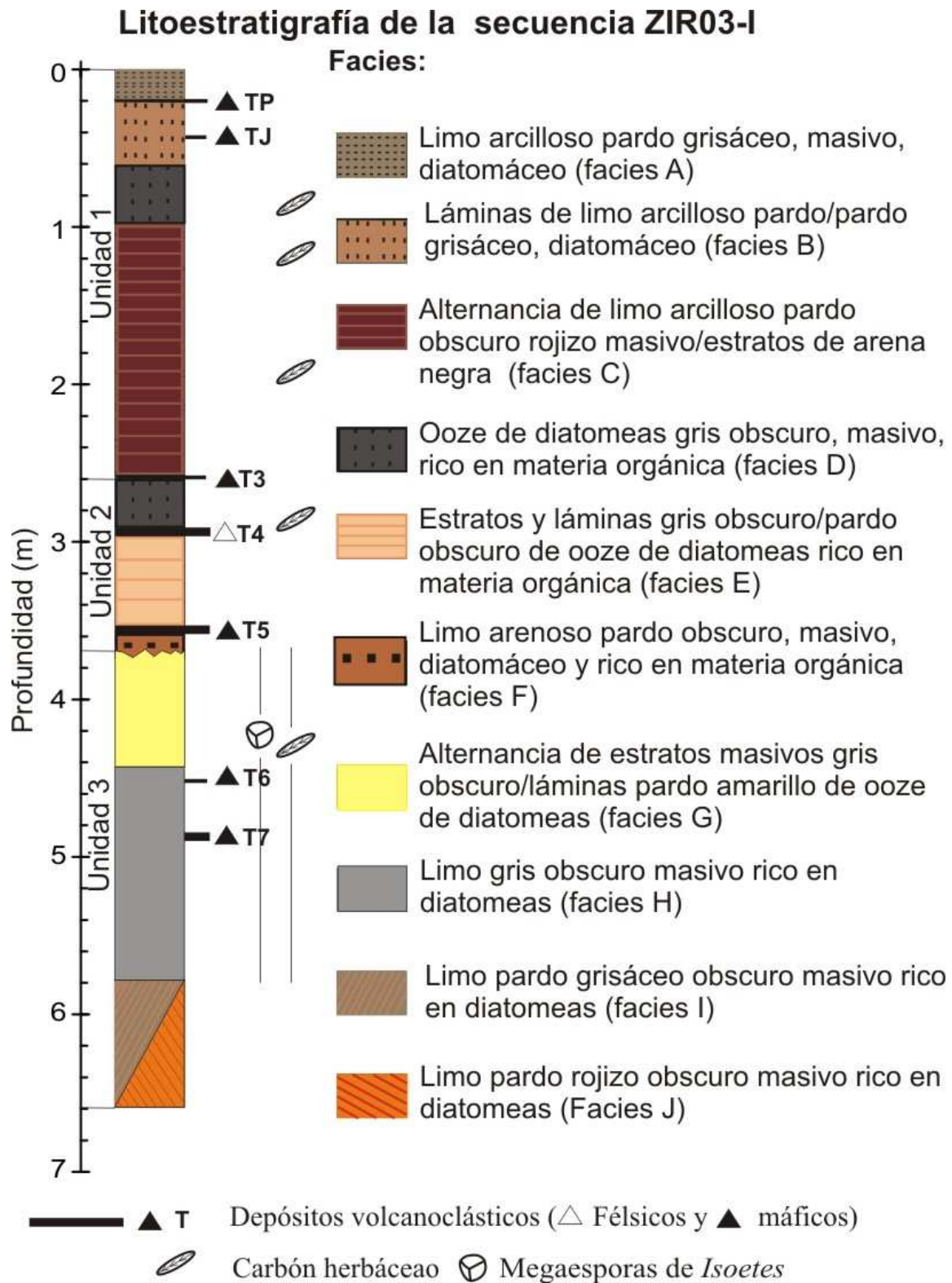


Figura 7. Litoestratigrafía del núcleo sedimentario ZIR03-I. Se muestran las 10 facies sedimentarias que conforma esta secuencia. También se señalan los depósitos de tefra (T) registrados (modificado de Ortega-Guerrero *et al.*, en revisión).

Análisis de Polen

Con base en el análisis palinológico de la secuencia sedimentaria ZIR03-I se identificaron 67 tipos de palinomorfos los cuales fueron divididos en 5 grupos. El Grupo I está constituido por taxa arbóreos de los cuales fueron identificados 9 géneros y 1 especie (lámina I). El Grupo 2 los conforman las hierbas dentro del cual fueron identificadas 8 familias, 11 géneros y una especie (láminas II-III). El Grupos 3 constituido por las pteridofitas de las cuales se identificaron 4 tipos y 1 géneros (lámina IV). El Grupo 4 está formado por los taxa acuáticos y se identificaron dentro de éste 5 familias, 5 géneros y 1 especie con dos tipos (lámina V). El grupo 5 está representado por algas, fungoesporas, cladóceros y quiromínidos. Dentro de las algas fue posible identificar una familia, 7 géneros y 1 especie (láminas IV y VI). Las 67 tipos de palinomorfos se encuentran enlistados a continuación:

Grupo 1, Árboles:

<i>Abies</i>	<i>Carpinus</i>	<i>Pinus</i>	<i>Tilia mexicana</i>
<i>Alnus</i> tipo 1	<i>Celtis</i>	<i>Quercus</i>	
<i>Alnus</i> tipo 2	<i>Fraxinus</i>	<i>Salix</i>	

Grupo 2, Hierbas:

Asteraceae tipo 1	Chenopodaceae-Amaranthaceae Tipo 1	<i>Thalictrum</i> tipo 1	<i>Crucifera</i>
Asteraceae tipo 2	Chenopodaceae-Amaranthaceae Tipo 2	<i>Thalictrum</i> tipo 2	<i>Rorippa</i>
Asteraceae tipo 3	Chenopodaceae-Amaranthaceae Tipo 3	<i>Euphorbia</i>	<i>Zea</i>
Asteraceae tipo 4	Chenopodaceae-Amaranthaceae Tipo 4	<i>Ambrosia</i>	<i>Zea mays</i> tipo 1
Asteraceae tipo 5	Euphorbiaceae	<i>Hyptis</i>	<i>Zea mays</i> tipo 2
Asteraceae tipo 6	Labiatae	<i>Potentilla</i>	
Poaceae tipo 1	Rosaceae tipo 1	<i>Gallium</i> tipo 1	
Poaceae tipo 2	Rosaceae tipo 2	<i>Gallium</i> tipo 2	
Poaceae tipo 3	Ranunculaceae	<i>Artemisia</i>	
Poaceae tipo 4	Rubiaceae	<i>Plantago</i>	

Grupo 3, Pteridofitas:

Trilete tipo 1	<i>Polypodium</i> tipo 1
Trilete tipo 2	<i>Polypodium</i> tipo 2
Trilete tipo 3	<i>Polypodium</i> tipo 3
Trilete tipo 4	

Grupo 4, Acuáticas:

Cyperaceae tipo 1	Cyperaceae tipo 7	Onagraceae tipo 1	<i>Typha</i>
Cyperaceae tipo 2	Onagraceae tipo 2	<i>Myriophyllum</i>	<i>Polygonum</i>
Cyperaceae tipo 3	Caryophyllaceae	<i>Arceuthobium</i>	
Cyperaceae tipo 4	Liliaceae	<i>Isoetes</i> tipo 1	
Cyperaceae tipo 5	Polygonaceae tipo 1	<i>Isoetes</i> tipo 2	
Cyperaceae tipo 6	Polygonaceae tipo 2		

Grupo 5, Algas, cladóceros, quiromínidos:

<i>Coelastrum reticulatum</i>	Zygnemataceae tipo 3	Fungoespora tipo 1
<i>Pediastrum</i> tipo 1	Zygnemataceae tipo 4	Fungoespora tipo 2
<i>Pediastrum</i> tipo 2	Zygnemataceae tipo 5	Fungoespora tipo 3
<i>Botryococcus</i>	<i>Scenedesmus</i> tipo 1	Fungoespora tipo 4
<i>Staurastrum</i>	<i>Scenedesmus</i> tipo 2	Fungoespora tipo 5
<i>Debarya</i>	<i>Gloeotrichia</i> aff. <i>equinulata</i>	Fungoespora tipo 6
Zygnemataceae tipo 1	<i>Bosminia longirostris</i>	Fungoespora tipo 7
Zygnemataceae tipo 2	Quirominido	Fungoespora tipo 8

Asignación taxonómica de las microesporas y megaesporas de *Isoetes* en la secuencia sedimentaria ZIR03-I.

El núcleo sedimentario ZIR03-I se caracteriza por la presencia de un gran número de microesporas y de megaesporas pertenecientes al helecho acuático del género *Isoetes* (Figura 8; lámina V).

El género *Isoetes* agrupa aproximadamente 200 especies pertenecientes a la familia Isoëtaceae y a la división Lycopodiophyta (Moran y Riba, 1995) cuyas especies tienen una distribución amplia. Todas las plantas pertenecientes a este género son heterospóricas; producen dos tipos de esporas, las megaesporas que al germinar forman los gametofitos femeninos y las microesporas que producen los gametofitos masculinos (Jones, 1987). Valdez-Ávila *et al.*, (2009) hacen una revisión de éste género y de acuerdo con Smith (1981); Bonilla y Novelo (1995), Mickel y Smith (2004) señalan que para México hay seis especies (Tabla 2).

Taxa	Características de las Micro y megaesporas	Hábitat	Distribución
<i>Isoetes howelli</i>	Megaesporas blancas y ruguladas de 375-450 μm . Microesporas equinadas de 25-35 μm .	Crece en suelos fangosos a orillas de lagunas entre los 1000 y 1500 msnm. De noviembre a diciembre.	Baja California Sur.
<i>Isoetes mexicana</i>	Megaesporas: 275-375 μm . De color blanco o gris. Lisas o tuberculadas; los tubérculos ocasionalmente unidos formando pliegues. Microesporas: 25-35 μm verrucadas o equinadas.	Zonas inundadas. En bosques de pino-encino de 1750-2500 msn. De septiembre a noviembre.	Chihuahua, Durango, Hidalgo, Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Morelos, Querétaro y Zacatecas.
<i>Isoetes montezumae</i>	Megasporas: 400-550 μm Blancas lisas, tuberculadas o verrucadas. Microesporas: 25-35 μm equinadas a tuberculadas.	En bosques de pino-encino de 2000-3000 msnm. De agosto a septiembre.	Aguascalientes, D.F., Chiapas, Jalisco, Morelos, Michoacán, Nayarit, Querétaro y Zacatecas.
<i>Isoetes orcuttii</i>	Megaesporas: 250-350 μm Blancas; lisas, tuberculadas a verrucadas. Microesporas: 25-35 μm Equinadas-tuberculadas	En zonas poco húmedas a 300 msnm. De marzo a abril.	Baja California
<i>Isoetes pallida</i>	Megaesporas: 400-475 μm	En suelo saturado de agua. A	Oaxaca y Campeche.

<i>Isoetes pringlei</i>	Blancas lisas a tuberculadas. Microesporas: 25.35 μm tuberculadas.	100 msnm. De agosto a septiembre.	Chiapas, Jalisco, D. F. y Morelos.
	Megaesporas: 475-650 μm Blancas equinadas.	En temporada de lluvias de 2800 a 3000 msnm. De agosto a septiembre.	
	Microesporas: 35-45 μm Lisas.		

Tabla 2. Especies de *Isoetes* reportadas para México

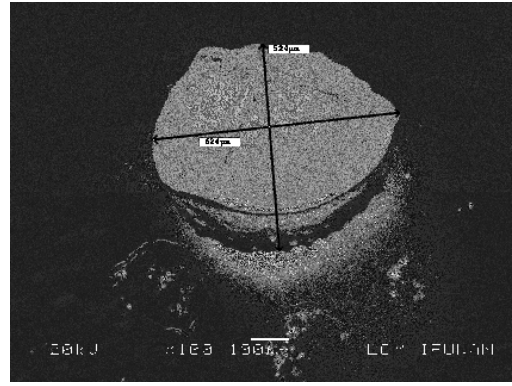
De las especies enlistadas en la tabla 2, vemos que las especies *I. mexicana* e *I. montezumae* han sido reportadas para el estado de Michoacán. Sin embargo, existe el registro de un ejemplar alojado en el Herbario Nacional del Instituto de Biología (UNAM perteneciente a la especie *I. echinospora* en el este de Agua Verde en el lago de Zirahuén), el cual fue colectado por Martha González Gutierrez (fecha desconocida) y descrito como una hidrófita enraizada sumergida de 10 cm de altura que habita la orilla del lago dentro del intervalo de 0 a 20 cm de profundidad. Las megaesporas tomadas de este ejemplar se caracterizaron por presentar una pared equinada y un diámetro promedio de 500 μ . No fue posible llevar a cabo un proceso de extracción de microesporas.

En la secuencia ZIR03-I se encontraron dos tipos de microesporas: 1) microesporas lisas de $\pm 17 \mu\text{m}$ y 2) microesporas lisas de $\pm 35 \mu\text{m}$ (ilustradas en la Lámina V). Además se reporta la presencia de megaesporas (Figura 8 c-d) triletes lisas ($\pm 576 \mu$ de diámetro) -con la excepción de una que presenta una pared verrugada ($\pm 624 \mu$ de diámetro) (Figura 8 a-b)- las cuales se encontraron en asociación con las microesporas más pequeñas ($\pm 17 \mu\text{m}$).

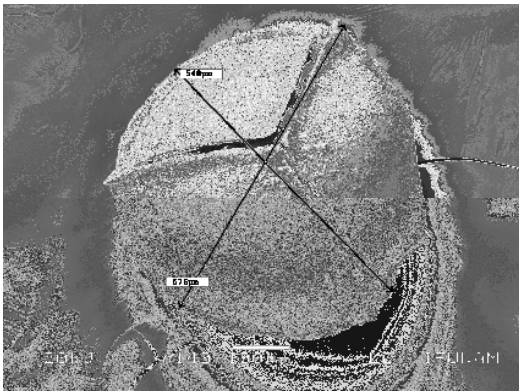
Las megaesporas de *I. mexicana*, *I. montezumae* e *I. echinospora* son más pequeñas en comparación con las registradas en el núcleo ZIR03-I. Además, la morfología de las megaesporas de *I. echinospora* no coincide con la registrada en este estudio ya que carecen de pared equinada. Debido a que ninguna de estas tres especies presentan microesporas con medidas similares a $\pm 17 \mu$, se decidió manejar en este trabajo a la asociación de este tipo de microesporas y megaesporas como *Isoetes* tipo 1; mientras que las microesporas de $\pm 35 \mu$ como *Isoetes* tipo 2, ya que no se cuenta con megaesporas preservadas para otra asignación taxonómica.



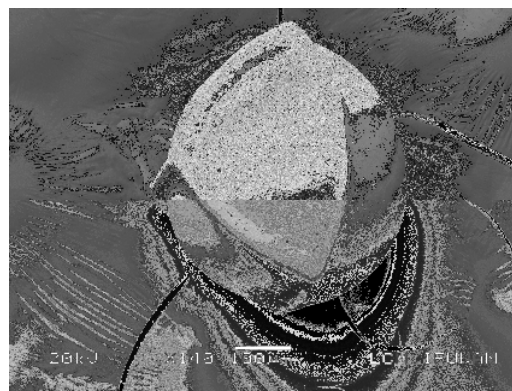
(a)



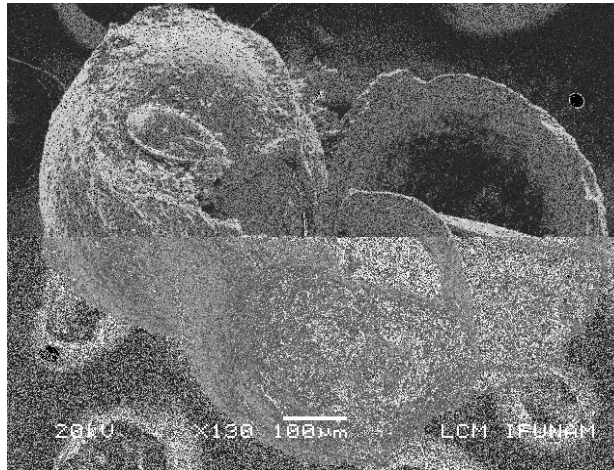
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 8. Megaesporas de *Isoetes* tipo 1. Fotografías electrónicas tomadas en el Instituto de Física (UNAM): (a) y (b) espora trilete verrucada en vista proximal; (c) espora trilete lisa en vista proximal; (d) en vista oblicua; (e) parte de una tétrada donde se observa la parte del perispermio.

Lámina I

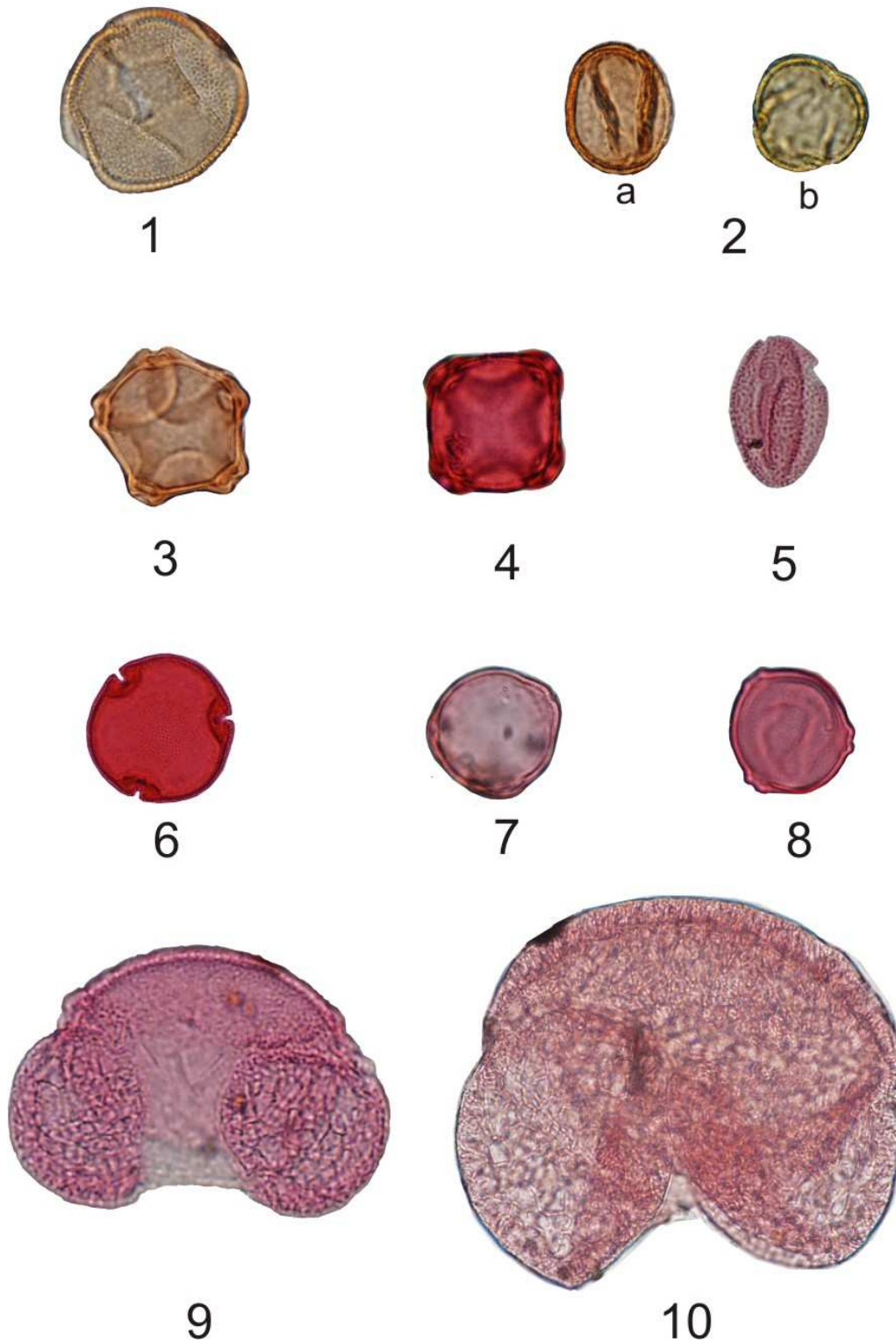


Lámina I. Árboles 1. *Fraxinus* (1000X), 2. *Quercus*: (a) vista ecuatorial y (b) vista polar (1000X), 3. *Alnus* tipo 1 (1000X), 4. *Alnus* tipo 2 (1000X), 5. *Salix* (1000X), 6. *Tilia mexicana* (1000X), 7. *Celtis* (1000X), 8. *Carpinus* (1000X), 9. *Pinus* (1000X) y 10. *Abies* (500X).

Lámina II

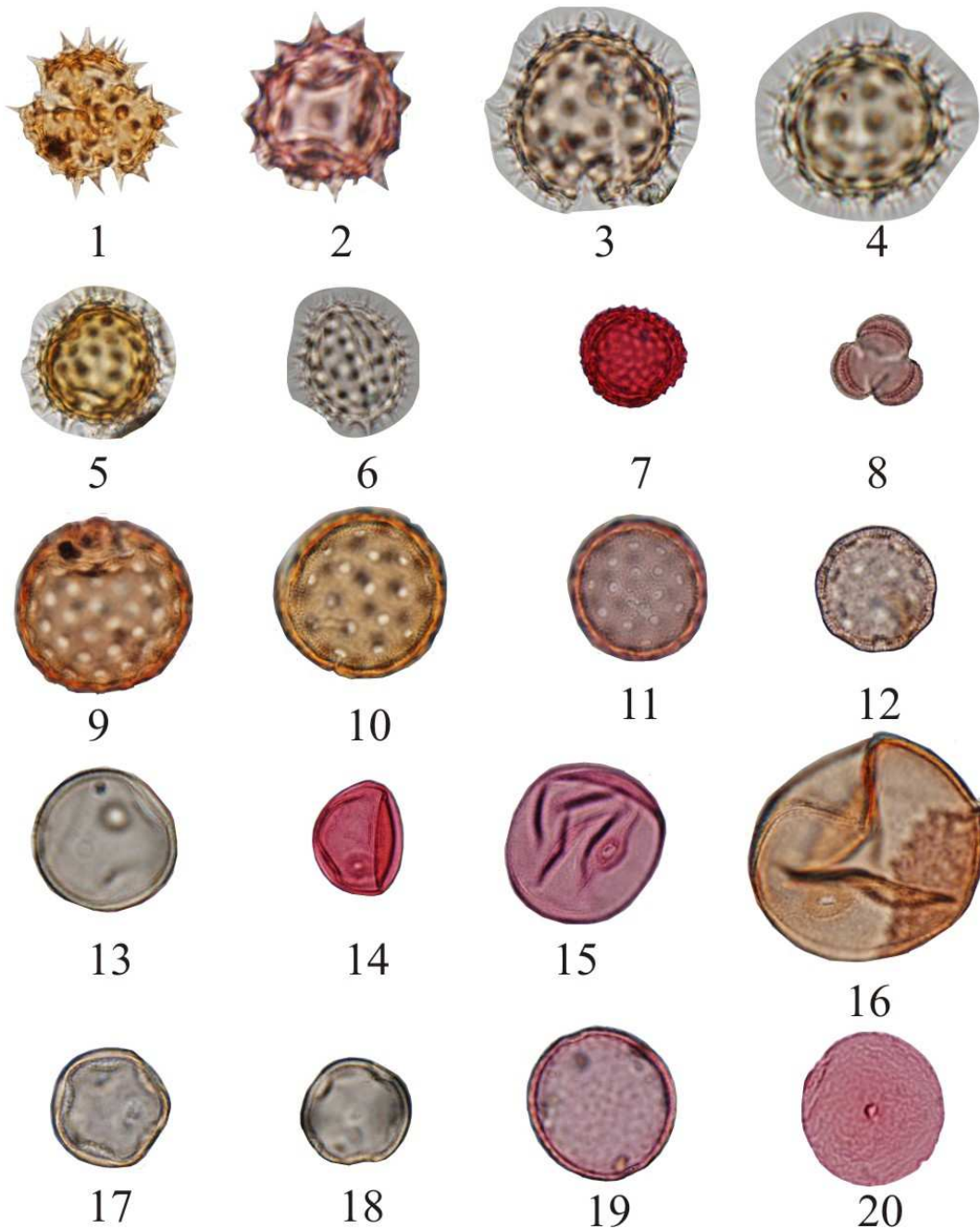


Lámina II. Herbáceas 1. Asteraceae tipo 1 (1000X), 2. Asteraceae tipo 2 (1000X), 3. Asteraceae tipo 3 (1000X), 4. Asteraceae tipo 4 (1000X), 5. Asteraceae tipo 5 (1000X), 6. Asteraceae tipo 6 (1000X), 7. *Ambrosia* (1000X), 8. *Artemisia* (1000X), 9. Chen-Am. Tipo 1 (1000X), 10. Chen-Am. Tipo 2(1000X), 11. Chen-Am. Tipo 3 (1000X), 12. Chen-Am. Tipo 4 (1000X), 13. Poaceae tipo 1 (1000X), 14. Poaceae tipo 2 (1000X), 15. Poaceae tipo 3 (1000X), 16. Poaceae tipo 4 (1000X), 17. *Thalictrum* tipo 1 (1000X), 18. *Thalictrum* tipo 2 (1000X), 19 y 20 *Plantago* (1000X).

Lámina III



Lámina III. Herbáceas 1. Crucifera (1000X), 2. *Rorippa* (1000X), 3. *Euphorbia* vista ecuatorial (1000X), 4. *Euphorbia* vista polar (1000X), 5. Labiatae vista ecuatorial (1000X), 6. Labiatae vista polar (1000X), 7. *Gallium* tipo 1 (1000X), 8. *Gallium* tipo 2 (1000X), 9. *Hyptis* (1000X), 10. *Potentilla* (1000X), 11. Rosaceae tipo 1 (1000X), 12. Rosaceae tipo 2 (1000X), 13. *Zea* (500X), 14. *Zea mays* tipo 1 (500X), 15. *Zea mays* tipo 2 (500X).

Lámina IV

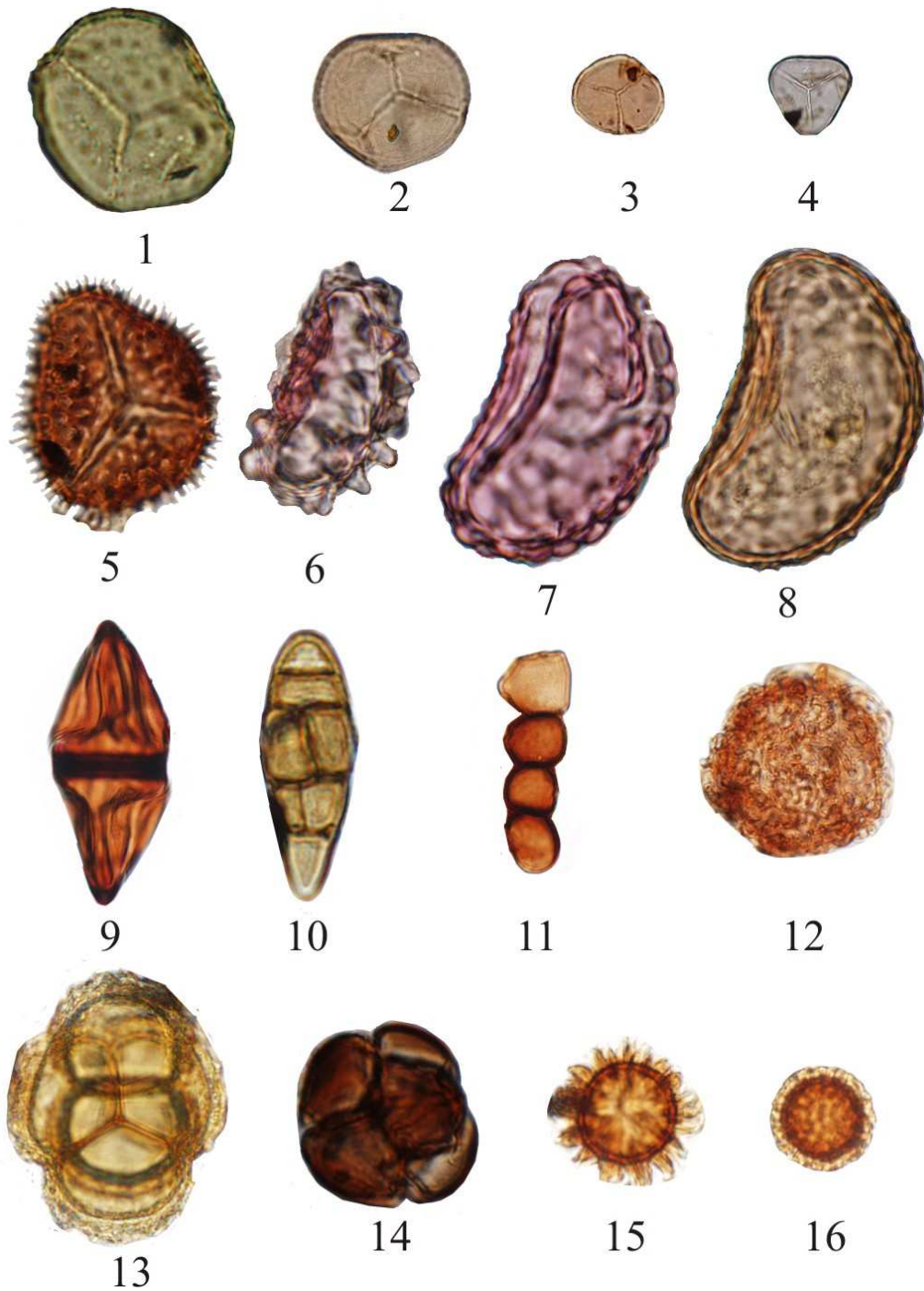


Lámina IV. Pteridofitas y fungoesporas 1. Tirlete tipo 1(1000X), 2. Tirlete tipo 2 (1000X), 3. Trilete tipo 3 (1000X), 4. Trilete tipo 4 (1000X), 5. Trilete tipo 5 (1000X), 6. *Polypodium* tipo 1 (1000X), 7. *Polypodium* tipo 2 (1000X), 8. *Polypodium* tipo 3 (1000X), 9Fungoespora tipo 1 (1000X), 10. Fungoespora tipo 2 (1000X), 11. Fungoespora tipo 3(1000X), 12. Fungoespora tipo 4 (1000X), 13. Fungoespora tipo 5 (1000X), 14. Fungoespora tipo 6 (1000X), 15. Fungoespora tipo 7 (1000X), 16. Fungoespora tipo 8 (1000X).

Lámina V

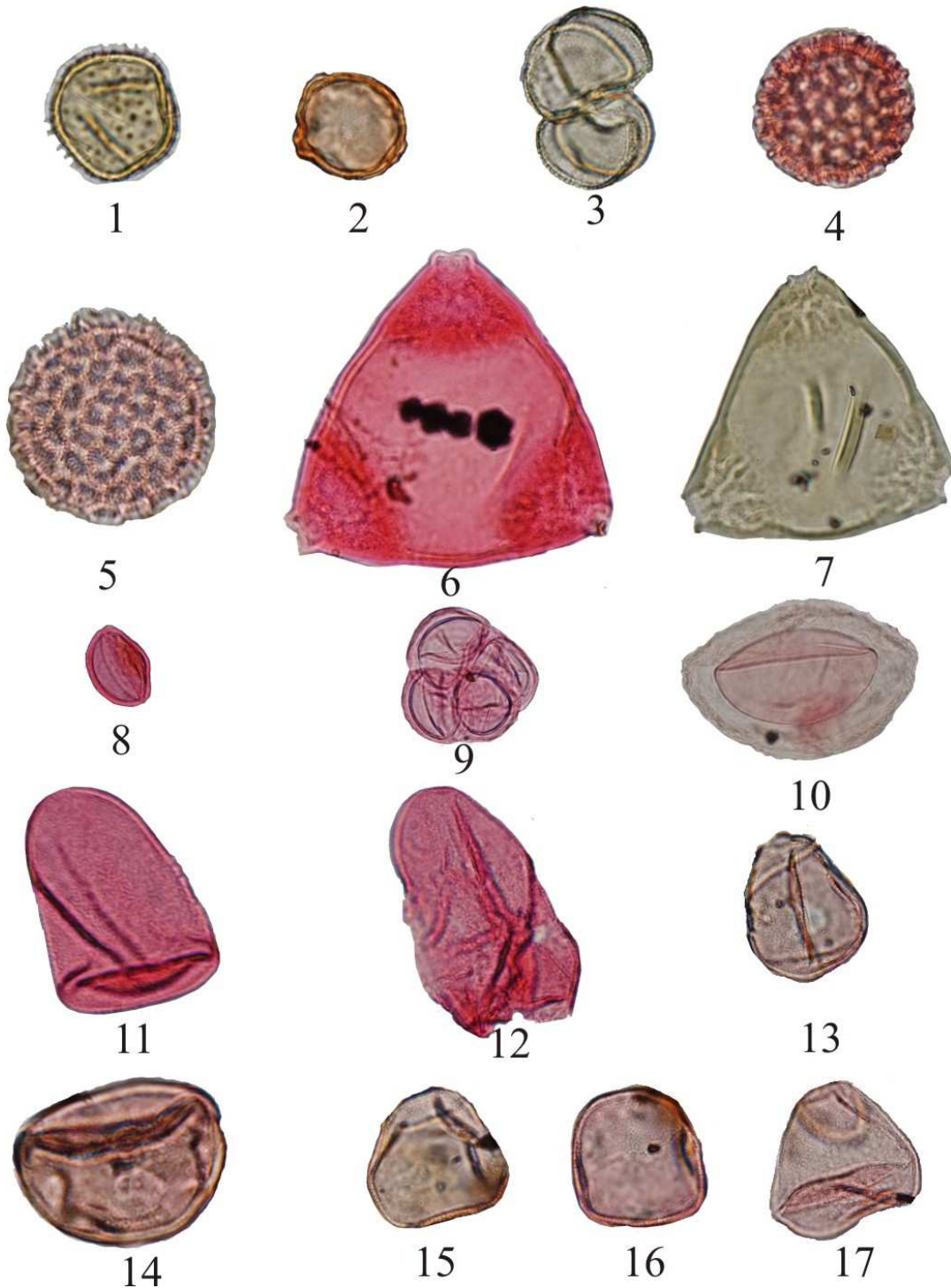


Lámina V. Acuáticas 1. *Arceuthobium* (1000X), 2. *Myriophyllum* (1000X), 3. *Typha* (1000X), 4. Polygonaceae tipo 1 (1000X), 5. Polygonaceae tipo 2 (1000X), 6. Onagraceae tipo 1 (1000X), 7. Onagraceae tipo 2 (1000X), 8. Microspora de *Isoetes* tipo 1 (1000X), 9. Tétrada *Isoetes* tipo 1 (1000X), 10. Microspora de *Isoetes* tipo 2 (1000X), 11. Cyperaceae tipo 1 (1000X), 12. Cyperaceae tipo 2 (1000X), 13. Cyperaceae tipo 3 (1000X), 14. Cyperaceae tipo 4 (1000X), 15. Cyperaceae tipo 5 (1000X), 16. Cyperaceae tipo 6 (1000X) y 17. Cyperaceae tipo 7 (1000X).

Lámina VI



Lámina VI. Algas 1. *Pediastrum* tipo 1 (1000X), 2. *Pediastrum* tipo 2 (1000X), 3. *Botryococcus* (1000X), 4. *Coelastrum reticulatum* (1000X), 5. Zygnemataceae tipo 1 (1000X), 6. Zygnemataceae tipo 2 (1000X), 7. Zygnemataceae tipo 3 (1000X), 8. Zygnemataceae tipo 4 (1000X), 9. *Debarya* (1000X), 10. *Concentricistis* (1000X), 11. Zygnemataceae tipo 5 (1000X), 12. *Scenedesmus* tipo 1 (1000X), 13. *Scenedesmus* tipo 2 (1000X), 14. *Staurastrum* (1000X), 15. *Bosminia longirostris* (1000X).

Zonación palinológica

La definición de las zonas palinológicas se llevó a cabo mediante un análisis de agrupamiento aglomerativo estratigráficamente restringido (CONISS) (Grimm, 1987) incluido en la programa TILIA 2.1 (Grimm, 1991-1993) únicamente con los datos de la vegetación regional (árboles, hierbas y pteridofitas) con el objeto de identificar los cambios más notorios en la vegetación y poder tener un registro temporal de éstos a través de la secuencia. Posteriormente, los datos de todos los taxa se representaron en dos tipos de diagramas: uno regional que incluyó elementos que se desarrollan alrededor del lago y uno local donde se ilustran los elementos que se desarrollan dentro del lago (Figuras 9 y 10). Además, se realizó un diagrama sintético con los taxa más importantes de la secuencia ZIR03-I (Figura 11).

Zona E: (660.0 cm a 398.0 cm; 16,800 a 12,630 cal AP) se divide en dos subzonas: subzona b) de 16,800 a 13,500 cal AP y subzona a) de 13,500 a 12,630 cal AP (Figuras 9 y 10). Esta zona está representada por 13 muestras cuya concentración de granos de polen oscila entre los valores 767 y 177,698 granos/cm³, mientras que la acumulación polínica oscila entre los valores 42 y 9,756 granos/cm²/año. El conjunto de árboles constituye el 94% del polen terrestre total de la zona mientras que las herbáceas forman un 3% y las pteridofitas forman el otro 3% restante.

La subzona b) (660.0 a 438 cm; 16,800 a 13,500 cal AP) está constituida por 9 muestras con una concentración de granos de polen de 2,736 a 177,698 granos por cm³ y una acumulación polínica de 152 a 9,756 granos por cm² al año. Los árboles constituyen el 96% del polen terrestre total de la subzona, las herbáceas el 1% mientras que las pteridofitas conforman el 3%.

Dentro del conjunto arbóreo, el polen de *Pinus* es el elemento más abundante y dominante (94%), mientras que el polen de *Quercus* y *Alnus* conforman el 2% del porcentaje del polen arbóreo total. El grupo de las herbáceas se encuentra representado en esta subzona por las familias Asteraceae, Poaceae, Chenopodiaceae y por el género *Plantago*. De éstos, la familia Asteraceae es la mejor representada conformando 0.5% del polen terrestre total mientras que las familias Poaceae Chenopodiaceae, y *Plantago* en conjunto conforman otro 0.5% del polen terrestre total. El conjunto de las pteridofitas está representado únicamente por *Polypodium* el cual conforma el 3% del polen terrestre.

En el registro local, el conjunto de plantas acuáticas está dominado por completo por micro y megasporas de *Isoetes* tipo 1 (Figuras 10 y 11); las microesporas son las más abundantes y presentan valores de concentración de 569, 528 a 29'018,493 de microesporas cada cm³. En presencias muy bajas (<0.5%) se registran las familias Cyperaceae, Onagraceae,

Polygonaceae, Caryophyllaceae, Liliaceae y el género *Typha*. Dentro de las algas encontramos *Coelastrum*, *Pediastrum*, *Botryococcus*, *Concentricistis*, *Debarya*, y Zygnemataceae. De éstas, las más frecuentes y que se presentan a lo largo de la subzona son *Botryococcus* y *Pediastrum* de los cuales el primero presenta porcentajes de 7-70% y el segundo de 2-60% del total de las algas. El resto presenta fluctuaciones a lo largo de la subzona. Sin embargo, es importante remarcar un valor de 90% de *Coelastrum reticulatum* a los 15,900 cal AP.

La subzona a) (428 a 398 cm; 13,500 a 12,630 cal AP) está representada por 4 muestras con una concentración de granos de polen de 767 a 25,813 por cm³ y una acumulación polínica de 42 a 1,417 granos por cm² al año. En esta subzona se registra una disminución en el polen arbóreo y un incremento en el polen de herbáceas; los árboles constituyen el 90% del polen terrestre total de la subzona, mientras que las herbáceas el 8% y las pteridofitas el 2%.

Dentro del conjunto arbóreo, el polen de *Pinus* continúa dominando (86%), mientras que el polen de *Quercus* y *Alnus* conforman el 4% del porcentaje del polen arbóreo (Figuras 9). El grupo de las herbáceas se encuentra representado en esta subzona por las familias Asteraceae, Poaceae y Chen-Am. De éstos, la familia Asteraceae es la mejor representada conformando 5% del polen de herbáceas mientras que el restante 3% lo constituye el polen de Poaceae y de Chen-Am. El conjunto de las pteridofitas está representado únicamente por *Polypodium* y conforma el 2% del polen terrestre total.

En el registro local, el conjunto de plantas acuáticas continúa dominado por microesporas y megaesporas de *Isoetes* tipo 1 (Figura 10). Sin embargo, se registra una baja importante en la concentración de microesporas cuyos valores oscilan de 2'181,462 a 2'981,807 por cm³. En presencias muy bajas (<0.5%) se registran Polygonaceae y *Typha*. Dentro de las algas encontramos *Coelastrum*, *Pediastrum*, *Botryococcus* y *Debarya*. Continúan siendo las mejores representadas *Botryococcus* y *Pediastrum* que en conjunto forman el 95% de las algas mientras que el 5% lo forman *Coelastrum reticulatum* y *Debarya*.

Zona D: (388 cm a 349 cm; 12,630 a 6,780 cal AP) se encuentra dividida en dos subzonas (a y b) (Figuras 9 y 10). Esta zona incluye un hiato que abarca de 12,100 a 7,160 cal AP (Figuras 10 y 11). Se analizaron para esta zona 9 muestras. La concentración de granos de polen oscila entre los valores 33,660 y 252,024 granos/cm³, mientras que la acumulación polínica oscila entre los valores de 200 a 13,836 No. granos/cm²/año.

La subzona b) (388 a los 375 cm; 12,630 a 12,100 cal AP) presenta una concentración de granos de polen que oscila entre 65,656 y 252,024 granos por cm³ y una acumulación de 365

y 13,836 granos por cm² al año. Esta subzona está constituida por 4 muestras. Los árboles constituyen el 94% del polen terrestre total de la subzona, mientras que las herbáceas conforman el 5% y las pteridofitas el 1%.

La comunidad arbórea de esta subzona está representada por *Pinus*, *Quercus*, *Alnus*, *Abies* y *Salix*. Los elementos dominantes son *Pinus* (63%), *Quercus* (16%) y *Alnus* (14%), mientras que *Abies* y *Salix* que aparecen por primera vez en el registro representan <1% del porcentaje del polen arbóreo total. Las herbáceas están representadas por las familias Asteraceae, Poaceae, Rosaceae, Ranunculaceae y Chen-Am. Además, de los géneros *Thalictrum*, *Ambrosia* y *Artemisia*. De éstas, la familia mejor representada es Asteraceae (3%) seguida por *Thalictrum* (1%); mientras que los elementos restantes en conjunto forman el 1% del polen de herbáceas restante. Se registra polen de *Polypodium* para el grupo de pteridofitas que constituye el 1% del polen terrestre total.

La comunidad acuática continúa dominada por *Isoetes* tipo 1 (99%) mientras que Cyperaceae, Onagraceae, Polygonaceae, Caryophyllaceae y Liliaceae se registran en presencias menores y en conjunto constituyen <1% del polen de acuáticas. El *Isoetes* tipo 1 se encuentra representado tanto por megaesporas como por microesporas; sin embargo, cabe destacar que a pesar de que domina la comunidad acuática, éste continúa disminuyendo registrándose valores de concentración de 489,148 a 1'963,749 microesporas por cm³ y se encuentra ausente a los 12,200 años cal AP, edad en la que domina por completo el polen Cyperaceae. Por otro lado, el conjunto de algas está representado por *Pediastrum*, *Botryococcus*, *Coelastrum reticulatum*, *Debarya* y *Scenedesmus*. De éstos, *Pediastrum* (78%) y *Botryococcus* (12%) son los elementos mejor representados constituyendo el 90% de las algas, mientras que el restante 10% se conforma por *Debarya*, *Coelastrum reticulatum* y *Scenedesmus*.

La subzona a) (370 a los 349 cm; 7,160 a 6,780 cal AP); formada por 5 muestras cuya concentración de granos de polen presenta valores de 33,660 a 151,413 granos por cm³ y la acumulación de 220 a 629 granos por cm² al año. Los árboles conforman el 95% mientras que las herbáceas el 4% y el conjunto de pteridofitas el 1% del polen terrestre total de la subzona.

El conjunto de árboles está representado por *Pinus*, *Quercus*, *Alnus*, *Abies*, *Salix*, *Tilia mexicana*, y *Celtis*. *Pinus* (45%), *Quercus* (31%) y *Alnus* (18%) son elementos dominantes de la subzona. Por otro lado, *Abies*, *Salix*, *Tilia mexicana* y *Celtis* en conjunto forman el 1% restante del porcentaje del polen arbóreo total. Las herbáceas que son escasas están representadas por las familias Asteraceae, Poaceae, Chen-Am., Euphorbiaceae y Rosaceae y por los géneros *Thalictrum*, *Artemisia*, *Plantago* y *Crucifera*, que en conjunto suman el 4% del

polen total de esta subzona. Los elementos mejor representados son Poaceae (1.5%) y Asteraceae (1.5%); todos los demás elementos suman 1%. Las pteridofitas (1%) se conforman por *Polypodium*.

La comunidad acuática está representada por Cyperaceae, *Myriophyllum*, *Typha* e *Isoetes* tipo 1. El elemento dominante a lo largo de la subzona continúan siendo las microesporas de *Isoetes* tipo 1 (96%) seguido por Cyperaceae (3.5%) y *Myriophyllum* y *Typha* (juntos <0.5%). En esta subzona la concentración de microesporas de *Isoetes* tipo 1 declina significativamente en la secuencia; se registran valores que oscilan entre 776,386 y 1,110 microesporas por cm³. Por otro lado, la comunidad de las algas se representa por *Coelastrum reticulatum*, *Pediastrum*, *Botryococcus*, *Debarya*, *Scenedesmus* y *Gloeotrichia* aff. *equinulata*. Los elementos mejor representados son *Botryococcus* (55%), *Pediastrum* (18%) y *Coelastrum reticulatum* (12%) que juntos conforman el 85% de la comunidad de algas, mientras que el restante 15% los constituyen *Scenedesmus*, *Gloeotrichia* aff. *equinulata*, y *Debarya*. Algo importante en el grupo de la algas es la aparición de restos de *Gloeotrichia* aff. *equinulata* a los 6,900 cal AP (355 cm de profundidad); este tipo de alga tienen un papel ecológico importante del cual más adelante se discutirá. Sólo se presenta en esta subzona y su intervalo de presencia es muy corto- de 6,900 a 6,780 cal AP- donde desaparece por completo y no se vuelve a observar a lo largo de esta secuencia sedimentaria a diferencia de los otros tipos de algas (Figura 11).

Zona C: (345 cm a 269 cm; 6,780 a 4,300 cal. AP) está representada por 16 muestras y está dividida en dos subzonas (a y b) (Figuras 9 y 10). La concentración de granos de polen oscila entre los valores de 20,786 y 149,110 granos/cm³, mientras que la acumulación polínica oscila entre los valores 628 y 2,716 granos/cm²/año.

La subzona b) está representada por una sola muestra, que corresponde a la profundidad 345 cm (6,660 años cal. AP). La concentración de granos de polen es de 22,801 granos/cm³, y su acumulación polínica de 1,140 No. granos/cm²/año. Los árboles constituyen el 91% del polen terrestre total de la subzona; las herbáceas el 7% y las pteridofitas el 2%.

La comunidad arbórea está representada por *Quercus* (47%), *Alnus* (35%), *Abies* (7%), *Tilia* y *Carpinus* (juntos el 2% del porcentaje de polen arbóreo total). Las herbáceas se representan por las familias Asteraceae, Poaceae, Chen-Am., Rubiaceae, Rosaceae y por los géneros *Euphorbia* y *Artemisia*. De las hierbas Poaceae es la mejor representada con un 4% del polen herbáceo total; Chen-Am., con 2% y el 1% lo constituyen los elementos restantes. Dentro de las pteridofitas *Polypodium* representa el 1%.

Dentro del lago, las acuáticas solamente se presentan Onagraceae e *Isoetes* tipo 1. De los cuales las microesporas de *Isoetes* tipo 1 son el dominante (98%) con una concentración de 3,848 microesporas por cm^3 y el restante 2% es Onagraceae. Las algas están representadas por *Botryococcus*, *Coelastrum reticulatum* y *Pediastrum*. *Botryococcus* domina sobre los otros dos con un 98% mientras que *Coelastrum reticulatum* y *Pediastrum* en conjunto constituyen el 2% de las algas de esta subzona.

La subzona a) (339 a 269 cm; 6,700 a 4,300 cal AP); constituida por 15 muestras cuya concentración de granos de polen oscila entre los valores 20,786 y 149,110 granos/ cm^3 , mientras que la acumulación polínica oscila entre los valores de 628 a 4,069 granos/ $\text{cm}^2/\text{año}$. Los árboles constituyen el 93% del polen terrestre total, las herbáceas el 5% y las pteridofitas el 2%.

La comunidad arbórea está representada por *Pinus*, *Quercus*, *Alnus*, *Abies*, *Salix*, *Fraxinus*, *Tilia* y *Carpinus*. *Pinus* (34%) es el elemento dominante a lo largo de la subzona; es importante señalar que a pesar de que este taxón reaparece en la secuencia los valores que tiene en esta subzona son menores considerablemente con respecto a las zonas palinológicas anteriores. El segundo elemento arbóreo mejor representado es *Quercus* (30%) seguido por *Alnus* (27%); *Abies* constituye únicamente 1% mientras que *Salix*, *Fraxinus*, *Tilia mexicana* y *Carpinus* el 1% del porcentaje total del polen arbóreo. Las herbáceas están representadas por las familias Asteraceae, Poaceae, Chen-Am., Euphorbiaceae, Rubiaceae y Rosaceae. Además de los géneros *Thalictrum*, *Euphorbia*, *Ambrosia* y *Artemisia*. El elemento dominante es Poaceae que forma el 3% mientras que el otro 2% los constituyen todos los demás taxa; dentro de este 2% los mejor representados son Asteraceae y Chen-Am., a diferencia de los demás que únicamente se registran en presencias $<0.05\%$. Las pteridofitas están representadas por *Polypodium* (2% del polen terrestre total).

El conjunto de las acuáticas está representado por Cyperaceae, *Typha*, *Isoetes* tipo 1 e *Isoetes* tipo 2. La concentración de las microesporas de *Isoetes* tipo 1 (96%) presenta valores de 217 a 73,962 microesporas por cm^3 , mientras que las microesporas de *Isoetes* tipo 2 únicamente constituyen un 3% y se presenta solamente en dos intervalos de tiempo (5,000 a 4,900 cal AP y 4,300 cal AP) y sus concentraciones oscilan entre 4,603 y 154,252 microesporas por cm^3 . Dentro del grupo de las algas se registran *Botryococcus* (73%), *Coelastrum reticulatum* (10%), *Pediastrum* (6%), *Staurastrum* (6%) y *Scenedesmus* (5%).

Zona B: (265 cm hasta los 96 cm; 4,300 a 1,400 cal AP) (Figuras 9 y 10), está representada por 32 muestras cuya concentración de granos de polen fluctúa entre los valores 2,433 y 239,626 granos/cm³, mientras que la acumulación polínica fluctúa entre los valores 201 y 17, 848 granos/cm²/año. El conjunto de árboles constituye el 80% del polen terrestre total, los herbáceas el 13% y las pteridofitas el 7%.

El polen arbóreo está representado por *Pinus* (69%), *Quercus* (8%), *Alnus* (2%), *Abies*, *Salix*, *Tilia mexicana* y *Carpinus* que en conjunto forman el 1% del polen arbóreo total. En esta zona vemos una reducción considerable en los porcentajes de polen de *Alnus* y *Quercus* con respecto a la zona C ligado a un incremento casi del doble en los porcentajes de polen de pino (37% en la subzona a de la zona C a 69% en esta zona). El polen herbáceo presenta un incremento con respecto a las zonas anteriores alcanzando el 13% del polen terrestre total y está representado por Asteraceae (7%), Chen-Am. (2%), Poaceae (2%), Euphorbiaceae, Rubiaceae, Labiatae, *Ambrosia*, *Artemisia*, *Euphorbia*, *Hyptis*, *Plantago*, *Thalictrum*, *Zea* y *Zea mays*: todos suman el faltante 2% del polen total de hierbas. Es importante remarcar la primera aparición en el registro de *Zea mays* a los 248 cm de profundidad (3, 560 años cal AP). Dentro de las esporas de pteridofitas, se tienen en esta zona los siete tipos de esporas trilete identificados los cuales junto con *Polypodium* constituyen el 7% del polen terrestre total de la zona; de éstas, las más abundantes corresponden a las esporas de la trilete tipo 2 (3%) seguido por *Polypodium* (2%) todas las demás suman 2%.

En el grupo de las acuáticas se observan las familias Cyperaceae, Polygonaceae y los géneros *Myriophyllum*, *Typha*, *Isoetes* tipo 1 e *Isoetes* tipo 2. Las microesporas de *Isoetes* tipo 1 (84%) presentan una concentración de 89 a 10, 382 microesporas por cm³ mientras que las microesporas de *Isoetes* tipo 2 una de 114 a 169 microesporas por cm³. Cyperaceae representa un 11% y los demás elementos representan 5%. Dentro del grupo de las algas *Concentricistis* representa el 52% mientras que *Botryococcus* el 33% y los demás taxa (*Coelastrum reticulatum*, *Pediastrum*, *Staurastrum*, *Scenedesmus* y Zygnemataceae) juntos constituyen el 15% de esta comunidad.

Zona A: (87 cm a 3 cm; 1,400 años cal AP al presente (Figuras 12 y 13); representada por 18 muestras cuya concentración de granos de polen oscila entre los valores 30,892 y 270,534 granos/cm³, mientras que la acumulación polínica oscila entre los valores 2,093 y 18,333 granos/cm²/año. El polen arbóreo suma el 82% del polen terrestre, el polen de plantas herbáceas el 16% y el polen de pteridofitas el 2%.

El polen arbóreo está representado por *Pinus* (62%), *Quercus* (17%), *Alnus* (2%), *Abies*, *Salix*, *Tilia mexicana* y *Carpinus* que juntos únicamente conforman 1% del polen arbóreo total. Las herbáceas están conformadas por las familias Asteraceae, Poaceae, Chen-Am., Euphorbiaceae, Rubiaceae, Labiatae, Rosaceae; por los géneros *Thalictrum*, *Euphorbia*, *Ambrosia*, *Hyptis*, *Potentilla*, *Artemisia*, *Plantago*, *Crucifera*, *Zea* y por la especie *Zea mays*. De todos, los elementos dominantes son Asteraceae y Poaceae cada uno con un 6% seguido por Chen-Am., con un 2% mientras que la suma del resto constituye un 2%. Las pteridofitas representadas por las esporas trilete (tipo 1, 2, 3, 5, 6, y 7) junto con *Polypodium* forman el 2% del polen terrestre total de la zona.

En el grupo de plantas acuáticas se registran las familias Cyperaceae, Onagraceae, Polygonaceae y por los géneros *Polygonum*, *Isoetes* tipo 1 e *Isoetes* tipo 2. Cyperaceae es el elemento dominante (46%) seguido por las microesporas de *Isoetes* tipo 1 (39%) cuya concentración presenta valores de 414 a 2,089 por cm³; la microesporas de *Isoetes* tipo 2 (9%) y su concentración oscila entre 103 y 8,245 microesporas por cm³. Las algas están representadas por *Staurastrum* (47%), *Coelastrum reticulatum* (49%), *Botryococcus* (3%), *Pediastrum*, *Concentricistis*, Zygnemataceae y *Scenedesmus* las cuales en conjunto constituyen el 1% de la comunidad de algas.

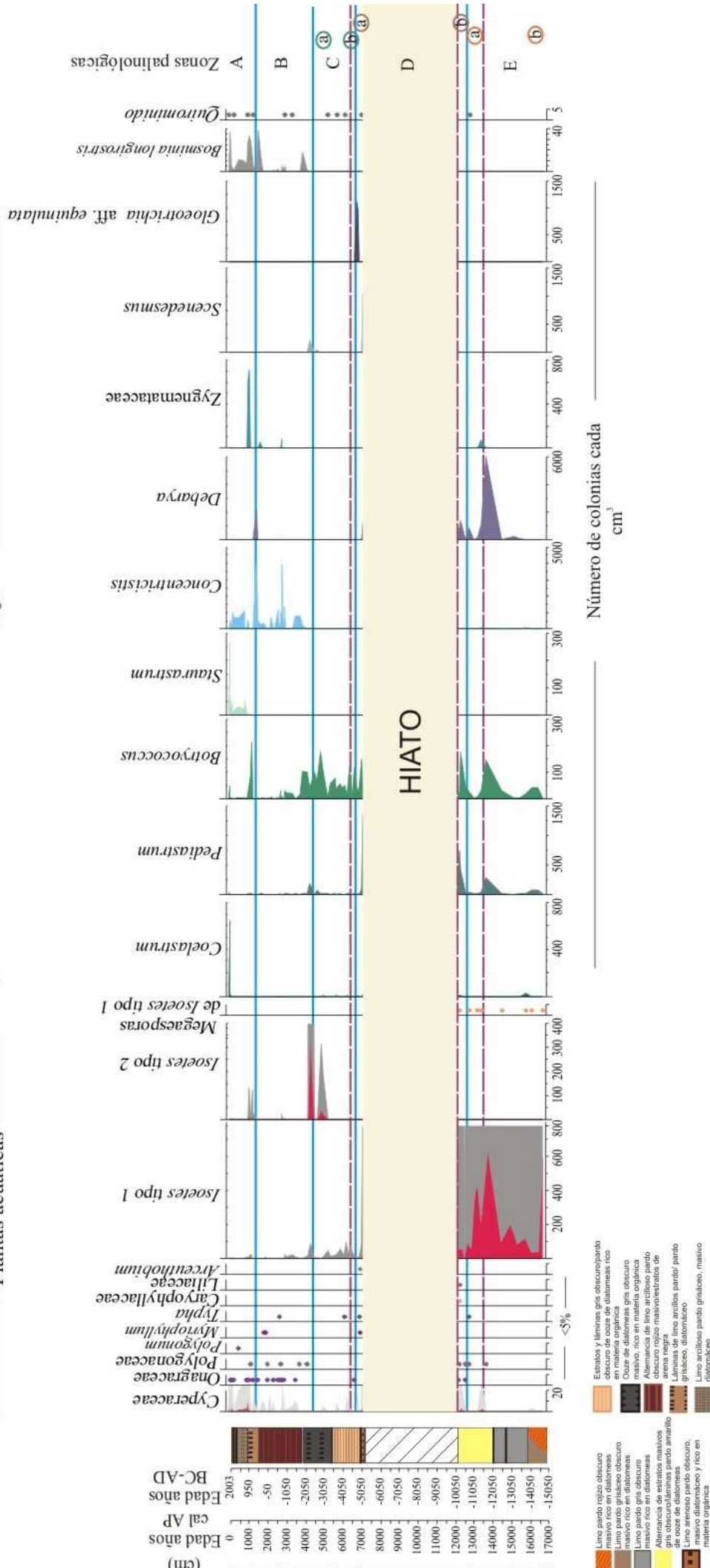


Figura 10. Diagrama palinológico de la vegetación local del lago de Zirahuén, Michoacán durante los últimos 17,000 años cal. AP. Se ilustran los principales taxa de la vegetación acuática registrados en la secuencia sedimentaria ZIR03-I. Los datos están graficados en años cal AP. Además se muestran la profundidad (cm) y las edades BC-AD. Las plantas acuáticas se representan como porcentajes de la suma de la vegetación regional excepto las esporas de *Isoetes* (tipos 1 y 2) las cuales se representan como datos de conteo al igual que las algas, *Bosminia longirostris* y los quirrominidos. Las zonas palinológicas se dividen con líneas de color azul y se señalan las subzonas de las zonas C, D y E.

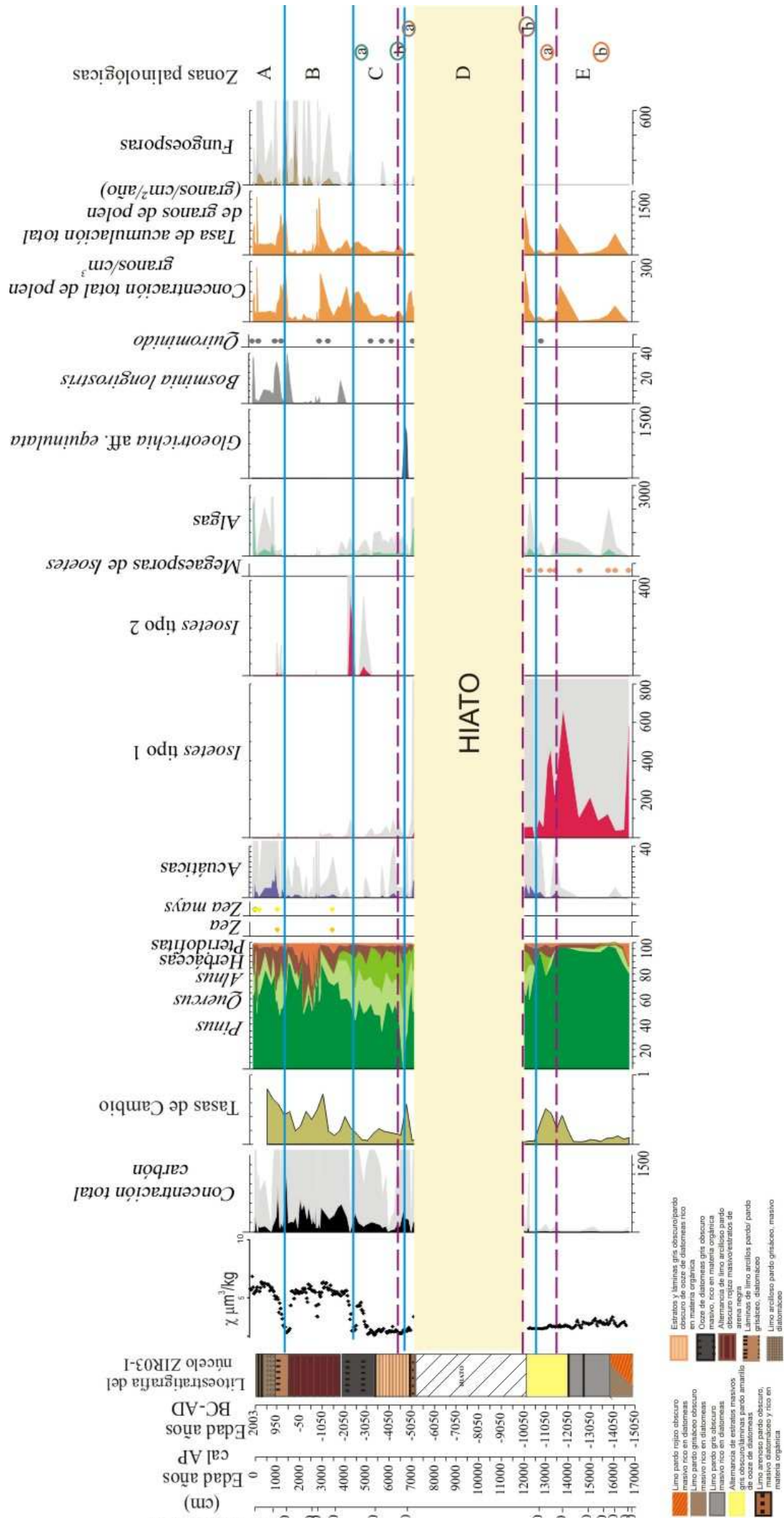


Figura 11. Diagrama palinológico sintético de los polinófitos presentes en el lago de Zirahuén, Michoacán durante los últimos 17, 000 años. Además, se ilustra la susceptibilidad magnética, la concentración de partículas de carbón (número de partículas por cm³) así como la concentración, el tiempo de depósito y la tasa de acumulación palinológica durante los últimos 17, 000 cal AP. Se señalan las zonas palinológicas (A, B, C, D y E) así como las subzonas palinológicas de las zonas C, D, y E.

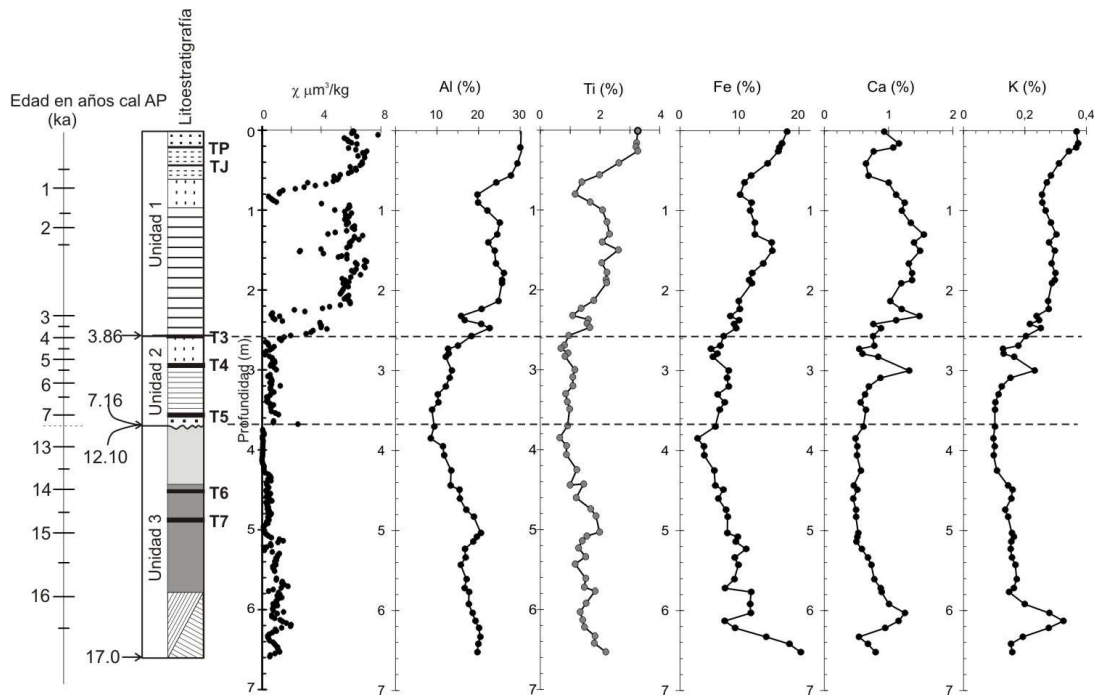


Figura 12. Datos geoquímicos de la secuencia sedimentaria ZIR03-I. Componentes clásticos; susceptibilidad magnética (χ) y elementos selectos medidos mediante fluorescencia de rayos X (FRX) en porcentajes de acuerdo a la profundidad. Además se muestran las unidades estratigráficas y las edades cal de ^{14}C cuyos límites se encuentran indicados. La edades se encuentran representadas como miles de años (Ka) (Tomado de Ortega-Guerrero *et al.*, en revisión).

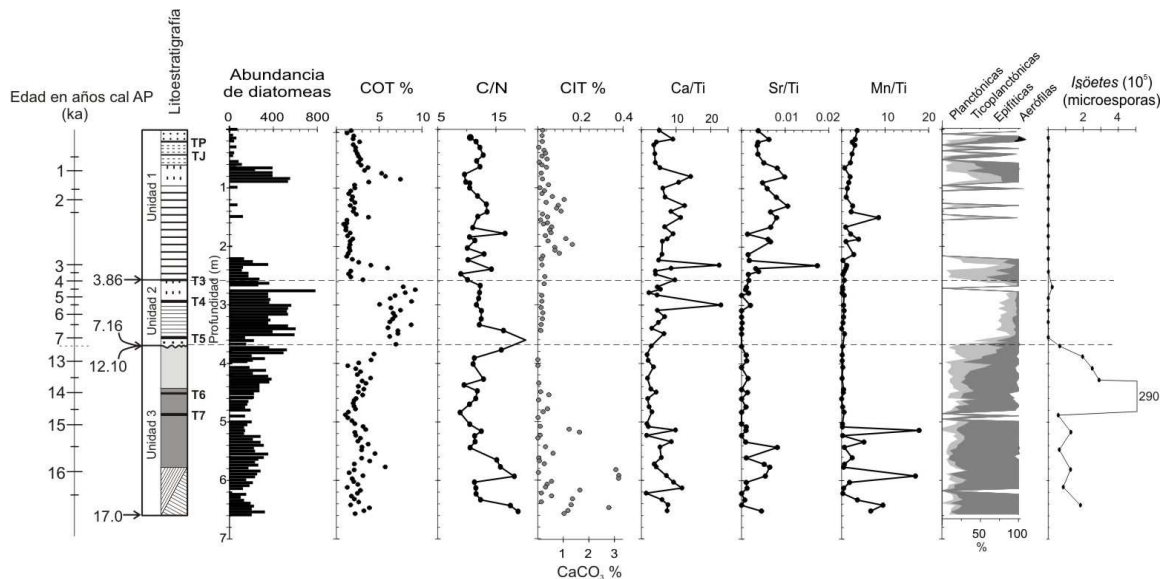


Figura 13. Componentes biogénicos registrados en el núcleo sedimentario ZIR03-I; abundancia de diatomeas expresada en 10^6 vgd, el COT (%), y la relación C/N. Los componentes carbonatados: CIT (%) y expresado también como $\% \text{CaCO}_3$; y las relaciones Ca/Ti, Sr/Ti, y Mn/Ti. Se muestran los grupos ecológicos de las diatomeas identificadas. Todos los registros están graficas contra la profundidad y el muestra el modelos de edad en años calibrados antes del presente, expresadas en miles de años (ka) (Modificado de Ortega-Guerrero *et al.*, en revisión).

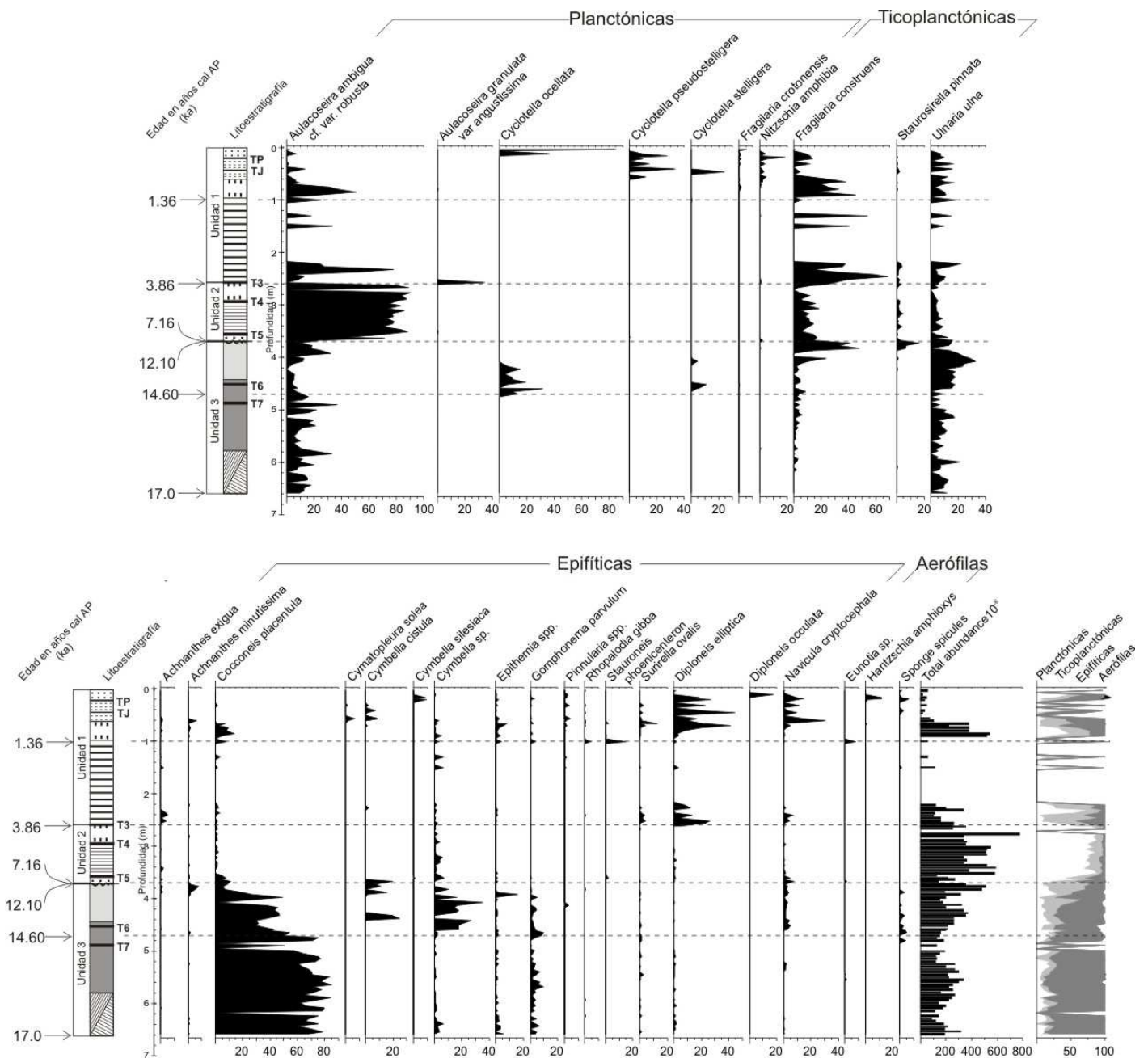


Figura 14. Diagramas del contenido de diatomeas de la secuencia ZIR03-I. Los taxa se encuentran representados como porcentajes de los conteos totales y están agrupados de acuerdo a su hábitat ecológico. Se encuentran graficados contra la profundidad y el modelo de edad en años calibrados antes del presente; expresados en miles de años (ka) (Tomado de Ortega-Guerrero *et al.*, en revisión).

Relación de la vegetación con el ambiente

Análisis de los palinomorfos acuáticos

N	Nombre	AX1	AX2	AX3	AX4
EIG		0.7770	0.1859	0.0593	0.0006
1	χ ($\mu\text{m}^3/\text{Kg}$)	0.9846	-0.2240	-0.3493	0.0363
2	COT%	0.0519	0.4196	-11, 402	0.1171
3	CIT%	-0.0866	0.0724	-0.1806	10, 265
4	Carbón []*	0.0766	0.7455	0.9234	0.0602

Tabla 3. Coeficientes de regresión de las variables ambientales y de los palinomorfos acuáticos con la ordenación de los ejes. *[] Concentración de partículas de carbón.

N	Nombre	AX1	AX2	AX3	AX4
FR	EXPLICADO	0.7597	0.1817	0.0580	0.0006
1	χ ($\mu\text{m}^3/\text{Kg}$)	217, 899	-17, 542	-12, 150	0.0159
2	COT%	10, 043	28, 747	-34, 708	0.0449
3	CIT%	-19, 536	0.5778	-0.6407	0.4585
4	Carbón []	15, 215	52, 401	28, 839	0.0237

Tabla 4. Valores de la prueba t para determinar la significancia de la correlación con los palinomorfos acuáticos. Todo valor de $t > 2.51$ es significativo. *[] Concentración de partículas de carbón.

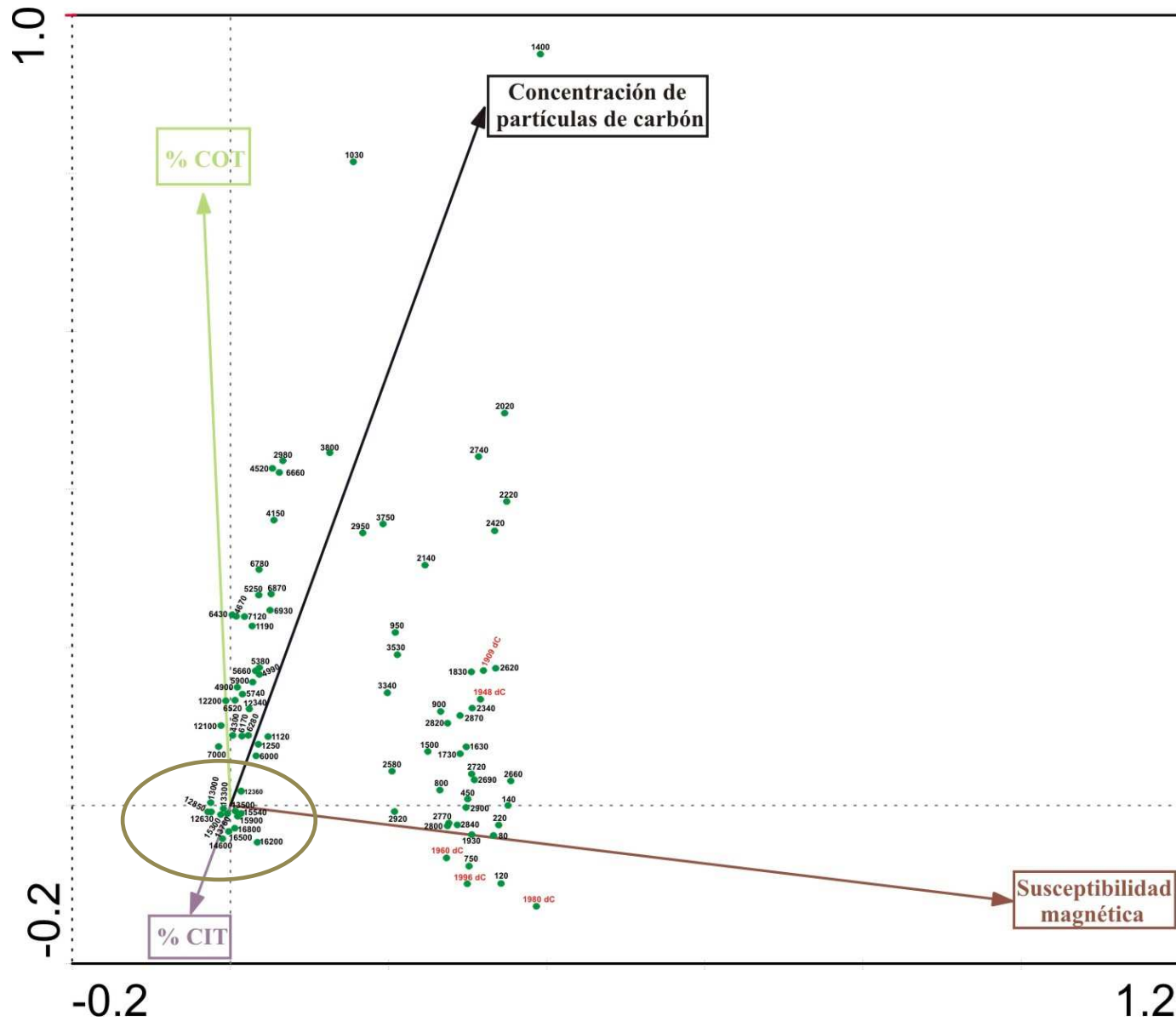


Figura 15. Diagrama de ordenación de las 88 muestras de la secuencia sedimentaria ZR03-I tomando en cuenta únicamente los palinomorfos acuáticos con respecto a las variables ambientales. Los puntos señalan las muestras y los números corresponden a la edad de cada muestra en años cal AP; excepto las edades en color rojo las cuales están representadas en años dC.

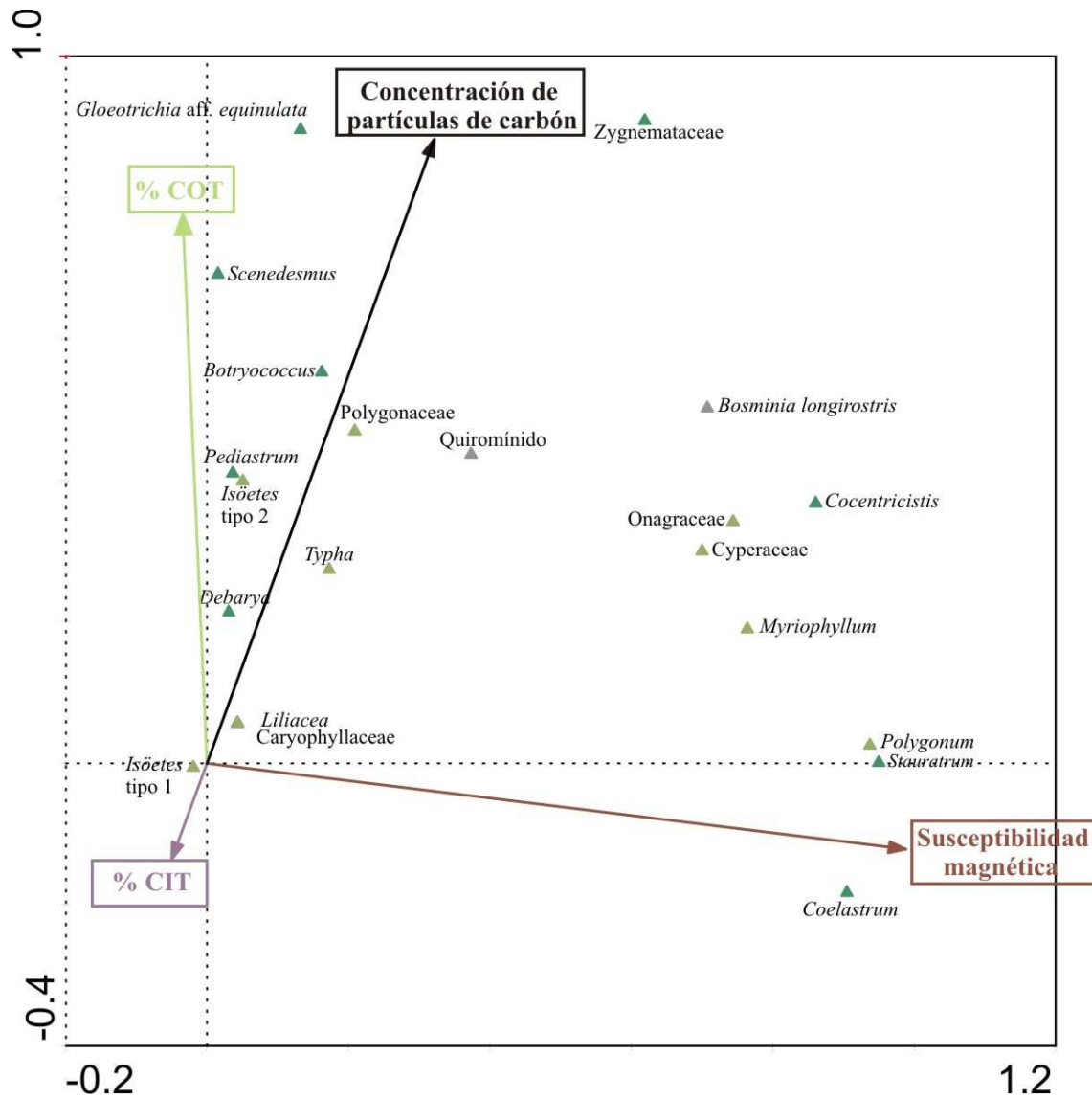


Figura 16. Diagrama de ordenación de los taxa de palinomorfos acuáticos con respecto a las variables ambientales representadas por vectores.

El ACC explicó el 94% del total de la varianza en los dos primeros ejes. En las tablas 3 y 4 se puede observar que el primer eje, contribuyó con el 76% de la varianza explicada con un eigenvalor de 0.7770. En este eje, la susceptibilidad magnética (χ), el porcentaje de carbono orgánico total (% COT) y la concentración de partículas de carbón presentaron coeficientes de regresión positivos con los palinomorfos acuáticos (0.9846; 0.0519 y 0.0766 respectivamente), mientras que el porcentaje de carbono inorgánico total (% CIT) presentó un coeficiente de regresión negativo (-0.0866) con los palinomorfos acuáticos. Por otro lado, el segundo eje, contribuyó con el 18% de la varianza explicada con un eigenvalor de 0.1859. En este eje, el porcentaje de carbono orgánico total (% COT), el porcentaje de carbono inorgánico total (% CIT) y la concentración de partículas de carbón mostraron coeficientes de regresión positivos

(0.4196; 0.0724 y 0.7455 respectivamente) a diferencia de la susceptibilidad magnética (χ) que mostró un coeficiente de regresión negativo de -0.2240. La prueba de t señala que en el primer eje las cuatro variables ambientales son estadísticamente significativas debido a que el valor absoluto de cada una es mayor a 2.51 en su valor absoluto. Sin embargo, en el eje 2 la prueba de t señala que el porcentaje de carbón inorgánico total no es estadísticamente significativo.

El diagrama de ordenación de acuerdo a la composición acuática presentado en el figura 15, agrupa a las muestras con edades que van de los 17,000 a los 12,360 cal AP debido a que éstas son las que presentan los valores más elevados tanto de microesporas como de megasporas de *Isoetes* tipo 1. Las muestras que parecen estar más relacionadas con el vector COT se asemejan principalmente por los porcentajes que presentan de *Botryococcus*, *Scenedesmus*, *Pediastrum* y *Debarya*, mientras que la muestra en torno a lo vectores de partícula de carbón y de susceptibilidad magnética son similares en cuanto a su composición y abundancia de herbáceas principalmente.

En la figura 16 mientras el eje 1 parece estar ligado con la susceptibilidad magnética (χ) y en los extremos presenta a *Isoetes* tipo 1, *Coelastrum*, *Polygonum* y *Staurastrum*; el eje 2 muestra mayor relación con la materia orgánica y separa por un lado a *Isoetes* tipo 1 y *Coelastrum* en los valores bajos y a *Gloeotrichia* aff. *equinulata* y *Zygnemataceae* en los valores altos. El análisis de dispersión de los taxa de palinomorfos acuáticos (Figura 16) producido por el ACC señala que *Isoetes* tipo 1, *Coelastrum*, *Polygonum* y *Staurastrum* tienen una relación mayor con la susceptibilidad magnética, de los cuales *Coelastrum* ocurre en muestras que presentan valores elevados de susceptibilidad magnética (χ), mientras que *Scenedesmus*, *Botryococcus*, *Pediastrum* *Debarya* e *Isoetes* tipo 2 se encuentran más relacionados con el carbono orgánico total; esto, posiblemente podría indicar un periodo de mayor producción dentro del lago por parte del fitoplancton y por consiguiente fluctuaciones en el estado trófico del lago.

Análisis de los palinomorfos terrestres

N	Nombre	AX1	AX2	AX3	AX4
EIG		0.1360	0.0191	0.0152	0.0016
1	χ ($\mu\text{m}^3/\text{Kg}$)	0.4472	0.8727	-10, 628	0.0865
2	COT%	-0.5828	0.8379	-0.9485	0.4840
3	CIT%	0.1418	-0.1903	-0.0985	10, 056
4	Carbón []*	0.0368	0.6580	0.7184	0.2663

Tabla 5. Coeficientes de regresión de las variables ambientales y de los palinomorfos terrestres con la ordenación de los ejes. *[] Concentración de partículas de carbón.

N	Nombre	AX1	AX2	AX3	AX4
FR	EXPLICADO	0.7914	0.1111	0.0884	0.0090
1	χ ($\mu\text{m}^3/\text{Kg}$)	40, 840	38, 975	-43, 109	0.1147
2	COT%	-52, 274	36, 751	-37, 786	0.6308
3	CIT%	18, 073	-11, 859	-0.5579	18, 626
4	Carbón []	0.4822	42, 125	41, 768	0.5066

Tabla 6. Valores de la prueba t para determinar la significancia de la correlación con los palinomorfos terrestres. Todo valor de $t > 2.51$ es significativo. *[] Concentración de partículas de carbón.

El ACC explicó el 90% del total de la varianza en los dos primeros ejes. En las tablas 5 y 6 podemos observar que el primer eje, contribuyó con el 79% de la varianza explicada con un eigenvalor de 0.1360. En este eje, la susceptibilidad magnética (χ), el porcentaje de carbono inorgánico total (% CIT) y la concentración de partículas de carbón presentaron coeficientes de regresión positivos con los palinomorfos terrestres (0.4472; 0.1418 y 0.0368 respectivamente), mientras que el porcentaje de carbono orgánico total (% COT) presentó un coeficiente de regresión negativo (-0.5828) con los palinomorfos acuáticos. Por otro lado, el segundo eje, contribuyó con el 11% de la varianza explicada con un eigenvalor de 0.0191. En este eje, la susceptibilidad magnética (χ), el porcentaje de carbono orgánico total (% COT), y la concentración de partículas de carbón tuvieron coeficientes de regresión positivos (0.8727; 0.8379 y 0.6580 cada uno) mientras que el porcentaje de carbono inorgánico total (% CIT) señaló un coeficiente de regresión negativo de -0.1903.

La prueba de t señala que las variables: susceptibilidad magnética (χ), porcentaje de carbono orgánico total (% COT) y porcentaje de carbono inorgánico total (% CIT) son estadísticamente significativas en el primer eje a diferencia del segundo en el cual las cuatro variables ambientales son significativas.

En la figura 17 se muestra la ordenación de las 88 muestras de vegetación analizadas para la secuencia sedimentaria ZIR03-I las cuales se encuentran representadas de acuerdo a su edad en años cal AP. De manera general este diagrama de ordenación hace una separación de las muestras de acuerdo a su similitud en composición y abundancia de tal manera que aquellas que se encuentran más cercanas en esta figura presenta una composición similar de polen terrestre. Se puede observar, que el diagrama de ordenación separa las muestras en tres grandes grupos. El grupo I abarca el intervalo de edad de 16,800 a 12,630 años cal AP (Pleistoceno tardío) y está representado por muestras con altos porcentajes de polen de pino. El grupo II incluye muestras del Pleistoceno tardío y del Holoceno medio y está conformado por muestras con altos porcentajes de polen de pino, encino, *Alnus* y por elementos mesofíticos, tales como *Carpinus*. El grupo III se conforma por muestras cuyas edades corresponden al Holoceno tardío las cuales se relacionan por los altos porcentajes de polen de herbáceas principalmente. Es importante señalar que las muestras que corresponden a las edades 1400 y 1030 cal AP se encuentran alejadas de las demás. En el caso de la muestra de 1400 cal AP posiblemente se deba a que ésta representa el porcentaje más alto en la secuencia de polen de Asteraceae y de *Ambrosia*. Por otro lado, la muestra de 1030 cal AP es la única que registrar polen de *Zea*.

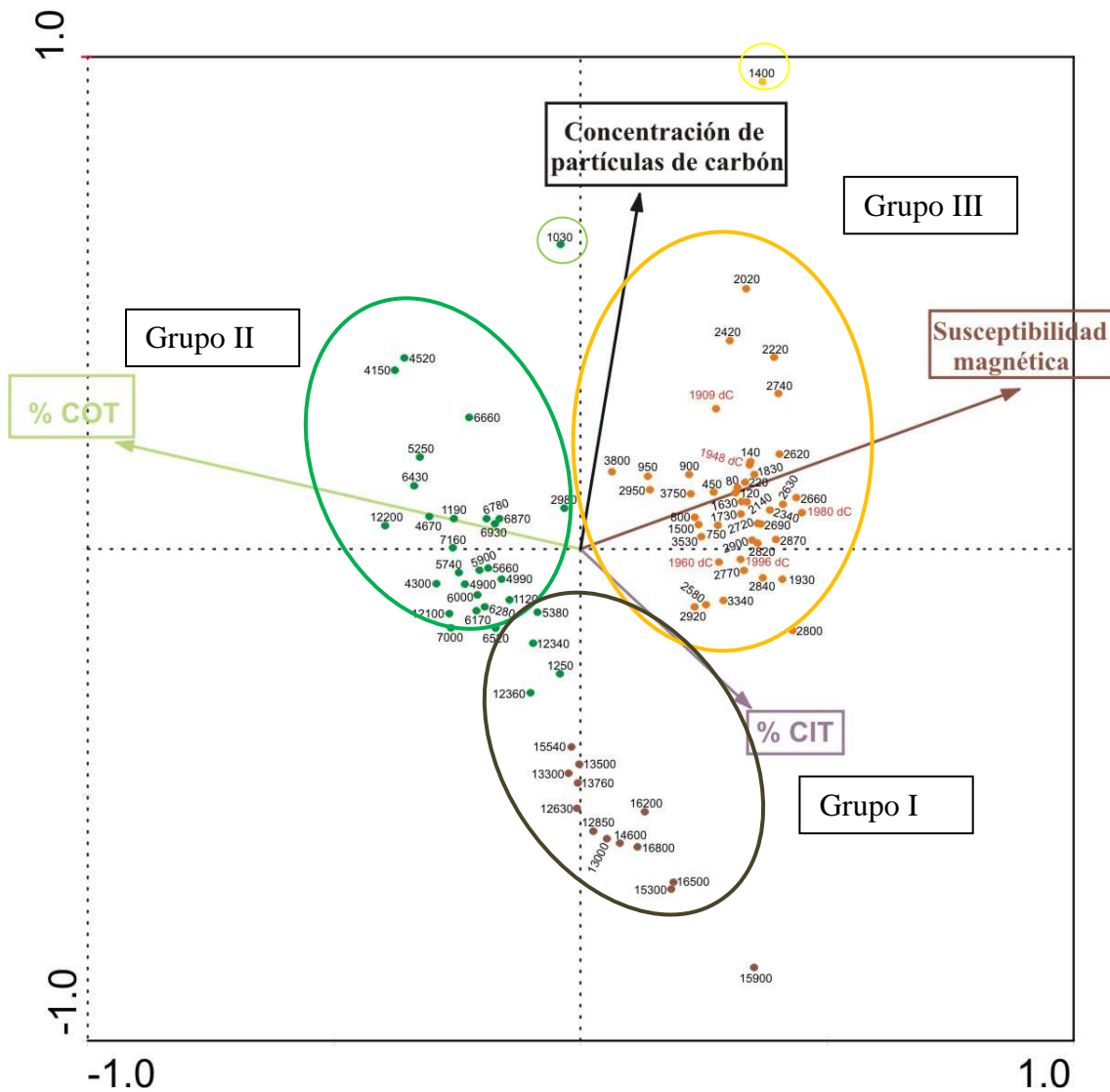


Figura 17. Diagrama de ordenación de las 88 muestras de vegetación de la secuencia sedimentaria ZIR03-I tomando en cuenta únicamente el polen terrestre con respecto a las variables ambientales. Cada muestra se encuentra representada por su edad en años cal AP. Los puntos señalan las muestras y los números corresponden a los años cal AP excepto los que están en rojo que corresponden a edades dC.

El análisis de la dispersión de los taxa de polen terrestre producidos por el ACC indica que la mayor parte de los taxa de polen terrestre contribuyen fuertemente a la ordenación de las muestras a lo largo de los gradientes climáticos (Figura 18). El polen de los taxa *Salix*, *Pinus*, *Zea mays*, *Rorippa*, *Asteraceae*, *Cheno-Am.*, *Euphorbia*, *Poaceae*, *Artemisia*, *Thalictrum*, *Artemisia*, *Rubiaceae*, *Euphorbiaceae*, *Crucifera*, *Plantago*, *Labiatae*, *Potentilla*, e *Hyptis* se encuentran fuertemente relacionados con valores altos en el vector de susceptibilidad magnética (χ) lo cual parece indicar una menor cobertura arbórea y el establecimiento de plantas herbáceas. Por otro lado, el polen de los taxa: *Fraxinus*, *Alnus*, *Tilia*, *Celtis*, *Carpinus*, *Abies*,

Discusión e interpretación de los resultados

A continuación se presenta la interpretación sobre la evolución de las comunidades vegetales a lo largo de la secuencia sedimentaria estudiada. Esta interpretación se llevó a cabo para seis periodos de tiempo marcados por los cambios más notorios tanto en la vegetación regional como en la local (Figuras 9-11); los cuales se encuentran apoyados por la información de los datos geoquímicos (Figuras 12 y 13), así como los de las diferentes asociaciones de diatomeas (Figura, 14) registradas para ZIR03-I en el estudio previo de Ortega-Guerrero *et al.* (en revisión). Además, en la figura 18 se presenta un resumen con los cambios más notorios identificados en dicha secuencia sedimentaria así como las tendencias climáticas inferidas en comparación con los datos propuestos por Ortega-Guerrero *et al.* (en revisión).

De los 17,000 a los 13,500 años cal AP se observan valores muy bajos en la concentración de polen (2,835 a 79,647 granos/cm³), los cuales en su mayoría se encuentran representados por granos de pino. Esto sugiere la existencia de un bosque de *Pinus* pobremente desarrollado (Figura, 14) alrededor del lago de Zirahuén. Este bosque probablemente formaba un pequeño estrato arbóreo el cual contaba a su vez con un sotobosque, representado principalmente por *Polypodium* y las herbáceas Asteraceae, Poaceae, Chenopodiaceae, y *Plantago* aunque en muy bajos porcentajes. Actualmente la mayor parte de los bosques de *Pinus* en el país se desarrollan en climas que van de templados a fríos y semihúmedos en suelos ácidos; en altitudes de 1 500 a los 3 000 m (Rzedowski, 1993). En su mayoría los bosques de pino son comunidades resistentes a heladas, a largos periodos de sequía, a incendios frecuentes, pastoreo y a otros tipos de maltrato. Se establecen bien sobre suelos someros, rocosos y muchas veces pobres en nutrientes minerales (Rzedowski, 1993).

En el lago de Zirahuén, en la actualidad el bosque de *Pinus* se desarrolla en altitudes de 2,100 a 3,000 msnm sobre Andosoles caracterizados por su gran profundidad y su buen drenaje. La especie mejor distribuida es *Pinus pseudostrobus* y se encuentra asociada en menor proporción con *Pinus leiophylla* y *Pinus michoacana*. Se ha visto que los bosques de pino constituyen fases sucesionales mantenidas por el fuego y es muy probable que dentro de las diferentes series sucesionales hay algunas, en las que pinares de una especie sustituyen a los de otra. Egger (1948) propuso que los pinares puros de *Pinus leiophylla* y de *Pinus pseudostrobus* en la región de Uruapan, Michoacán, parecían representar un subclímax y que la vegetación estable corresponde al bosque mixto de *Quercus* y *Pinus*. En Zirahuén, algunas áreas que probablemente presentaban en el pasado bosque mixto de pino-encino, y en las que los incendios son frecuentes, en la actualidad están ocupadas por *Pinus leiophylla*, mientras que en aquéllas áreas que fueron cultivadas y que han sido abandonadas se desarrolla un bosque cerrado y alto de *Pinus pseudostrobus*, como sucede al sur de Santa Clara del Cobre (Pérez-

Cáliz, 1996).

Durante este periodo (17,000 a 13,500 cal AP), la vegetación sub-acuática y acuática es la mejor representada en el registro polínico; la cual estaba dominada por el helecho acuático *Isoetes* tipo 1 (Figura 14); en asociación con porcentajes muy bajos de Cyperaceae, Onagraceae, Polygonaceae, Caryophyllaceae, Lilaceae y *Typha* así como con las microalgas *Botryococcus*, *Pediastrum*, *Coelastrum*, *Debarya*, Zygnemataceae y *Concentricistis*. *Isoetes* tiene una amplia distribución en regiones cálidas-templadas en todos los continentes. Un gran número de *Isoetes* son terrestres mientras que otros viven sumergidos en los márgenes de lagos, lagunas y arroyos a profundidades máximas de 2 a 3 m (Macluf *et al.*, 2003). Debido a que existe una gran abundancia tanto de microesporas (cuya concentración varía de 569, 528 a 29 millones de esporas/cm³) como de megasporas cuya preservación es muy buena (incluso fue posible observar la intina de las megasporas) se sugiere que *Isoetes* tipo 1 podría encontrarse *in situ* y haber sido una planta arraigada en la orilla del lago. Considerando que la especie actual (*Isoetes echinospora*) reportada para Zirahuén es una planta cuya longitud varía entre 10 y 15 cm y alcanza una profundidad máxima de 20 cm; *Isoetes* tipo 1 pudo haberse comportado de manera similar lo cual apoya que para este periodo el lago tenía un tirante de agua mucho menor al actual; casi 18 metros de agua menos.

Las microalgas *Botryococcus*, *Pediastrum*, *Debarya*, *Concentricistis*, *Coelastrum* y Zygnemataceae se encuentran pobremente representadas y sus abundancias son muy bajas esto podría deberse a que durante este tiempo la entrada de nutrientes al lago era muy baja limitando el desarrollo de las poblaciones de algas y otorgando al lago una condición oligotrófica con una baja producción primaria. Sin embargo a los 15,900 cal AP *Coelastrum* presenta valores altos y este tipo de alga ha sido reportada para ambientes de alta concentración de sales minerales resultantes de la descomposición de la materia orgánica o ambientes eutróficos (Pentecost, 1984; Ramírez, 2000). Lo anterior posiblemente podría indicar que hubo un mayor aporte de sedimentos al lago en esta edad que pudo haber beneficiado el florecimiento de dicha alga.

Las condiciones climáticas que se infieren para este periodo alrededor del lago de Zirahuén pudieron ser más frías y menos húmedas que las del presente. Debido a esto, las comunidades arbóreas alrededor del lago estaban pobremente desarrolladas. Además, la precipitación debió haber sido baja y por consiguiente los procesos de erosión; la entrada de nutrientes al lago era baja por lo que el desarrollo y el establecimiento de las comunidades del fitoplancton eran pocas. Posiblemente la producción de materia orgánica en la cuenca era menor (reflejado en los bajos valores de COT) (Figura 13) y menor la incorporación de nutrientes al lago. Esto podría estar sustentado por los valores bajos (<2 µm³/kg) (Figura 12) reportados en la

susceptibilidad magnética, los valores moderados de los elementos Al, Ti, Fe, Ca y K (Ortega – Guerrero *et al.*, en revisión) así como las tasa bajas de acumulación polínica registradas para este periodo.

La interpretación de un ambiente somero con una fuente de humedad más baja que la actual coincide con la interpretación obtenida a partir de la asociación de diatomeas reportada por Ortega-Guerro *et al.* (en revisión) para el periodo que va de los 16,820 a los 14,330 cal AP (6.60-4.75m) (Figura 14); la cual sugiere la presencia de un ambiente relativamente somero de agua dulce, ligeramente alcalina con abundante vegetación subacuática y acuática; indicado por la abundancia de taxa litorales epifíticos; principalmente, *Cocconeis placentula* en asociación con porcentajes más bajos de la ticoplanctónica *Ulnaria ulna*, y de la planctónica *Aulacoseria ambigua* var. *robusta*.

Con lo que respecta al ACC aplicado a los palinomorfos acuáticos, éste señaló que las muestras presentes en este intervalo de tiempo de 16,600 a 12,360 cal AP presentan altos porcentajes de microesporas de *Isoetes* tipo 1 (Figura 15). Asimismo, marca una relación de estas muestras con el vector de CIT. Dado que a partir de los 13, 000 cal AP se registra una fuerte disminución de estas microesporas esto podría sugerir que *Isoetes* tipo 1 estaba influenciado por los minerales que llegaban al lago por medio de los sedimentos. Por otro lado, el ACC aplicado a los taxa de polen terrestre reunió las muestras consideradas como grupo I abundantes en granos de pino (Figura 17).

De los 13,500 a los 12,100 años cal AP se observa un cambio en la comunidad arbórea- por primera vez en la secuencia con altos valores en la tasa de cambio palinológica (valores de 0.4 a 0.6) (Figura 11). Existe un incremento en los porcentajes de los géneros *Quercus* y *Alnus* así como en el polen de herbáceas y pteridofitas.

Se sabe que los bosques de *Alnus* en México pueden ser de dos afinidades ecológicas principales: pueden vivir a lo largo de arroyos y pequeños ríos o bien pueden constituir comunidades sucesionales de bosques de pino, de pino-encino y bosques mesófilos de montaña. Los estudios de vegetación en Michoacán señalan que la especie *Alnus acuminata* ssp. *arguta* crece rápidamente formando bosques secundarios en espacios de quedan dentro del bosque. Caballero *et al.* (en revisión) mencionan que un cambio en la temperatura durante el glacial tardío pudo haber promovido desplazamientos altitudinales en las comunidades boscosas alrededor de la cuenca de Pátzcuaro; de manera similar, pudo haber ocurrido en Zirahuén.

Es posible que en el lago de Zirahuén haya ocurrido un cambio en la humedad que contribuyó al establecimiento de un bosque de *Quercus* y de *Alnus* provocando una disminución y posiblemente un desplazamiento hacia partes más elevadas del bosque de pino. Actualmente en la ribera occidental del lago existe una franja muy angosta de *Alnus acuminata* ssp. *arguta* que es constantemente bañada por el oleaje, por lo cual la humedad en el sustrato es permanente.

Dentro de los elementos arbóreos se encuentra *Alnus acuminata* ssp. *arguta* y *Salix bonplandiana* (Pérez-Calix, 1996). Probablemente, a partir de los 15,200 cal AP las condiciones climáticas cambiaron y con ello la fuente de humedad, permitiendo el establecimiento alrededor del lago de una especie cuyo comportamiento era semejante a la especie actual *Alnus acuminata* ssp. *arguta*.

Dentro del lago, se registra una fuerte disminución en la concentración de microesporas de *Isoetes* tipo 1 (489,148 a 2'981,807/cm³) Por otro lado, se registra una diversidad de microalgas conformada por los géneros *Botryococcus*, *Coelastrum*, *Concentricystis*, *Debarya*, *Pediastrum* y *Scenedesmus*. Sin embargo su representación de la mayor parte de éstas es muy baja. Las mejor representadas son *Botryococcus* y *Pediastrum* con porcentajes y dominancias similares hasta 12,360 cal AP donde existe un incremento considerable de *Pediastrum* el cual se mantiene hasta 12,100 cal AP.

Crisman (1978) estudia especies de *Pediastrum* y concluye que estas son comunes en aguas duras de lagos eutróficos. Sin embargo, Nielsen y Sorensen (1992); Komárek y Jankovská (2001) y Sarmaja-Korjonen *et al.* (2006) hacen una revisión de este género y señalan que la mayor parte de las especies de *Pediastrum* prefieren condiciones eutróficas, aunque algunas pueden ser indicativas de aguas oligotróficas. Es posible que el lago antes de los 12,360 cal AP haya presentado una condición más oligotrófica o mesotrófica permitiendo el desarrollo tanto de *Botryococcus* como de *Pediastrum*. Sin embargo, a partir de dicha edad el estatus del lago pudo haber cambiado hacia condiciones más eutróficas ocasionando el incremento observado en *Pediastrum*. Ortega-Guerrero *et al.* (en revisión) mencionan que a partir de los 14,330 cal AP la productividad en el lago incrementa como lo indican los valores en la abundancia de diatomeas, los porcentajes del COT y los de la relación C/N. Esto también podría explicar la alta diversidad en el grupo de las algas y el cambio del lago hacia condiciones más eutróficas, mismo que se encuentra señala por el análisis ACC que relaciona para este periodo una gran parte de los taxa de palinomorfos en torno al vector COT (Figura 16), indicando que durante este tiempo, dicha variable ambiental tuvo una mayor influencia.

Es probable que durante este intervalo temporal (13,500-12,100 cal AP) haya incrementado la humedad gradualmente y por consiguiente la precipitación dentro de la cuenca del lago de Zirahuén, lo cual fue favorable para el desarrollo y el establecimiento de los bosques densos y cerrados de *Alnus* y *Quercus* lo cual explicaría las tasas de erosión bajas indicado por los valores bajos de susceptibilidad magnética ($<1\mu\text{m}^3/\text{kg}$) (Figura 12). Dicho incremento en la humedad pudo haber ocasionado una disminución en el hábitat de *Isoetes* tipo 1 y por ende se registran valores menores de este taxa.

Por otro lado, la asociación de diatomeas registrada para el intervalo que va de 14,400 a 12,560 cal AP (Figura 14) marca un incremento en la profundidad del agua comparado con el intervalo de 17,000 a 14,400 cal AP. Este incremento estuvo caracterizado por la reducción gradual en la abundancia de la diatomea epífita *Cocconeis placentula* asociada al incremento en los porcentajes de las ticoplanctónicas *Ulnaria ulna*, *Fragilaria contruens* y de la planctónica *Cyclotella ocellata*; esta última, el taxón más abundante en el lago actualmente (Davies *et al.*, 2002).

Posiblemente, este aumento en el nivel lacustre pudo ser desfavorable para la comunidad de *Isoetes* tipo 1 ya que registra que a partir de los 13,000 cal AP, las comunidades de este helecho disminuyen considerablemente a lo largo de la secuencia, a pesar de que se observan valores moderados de este taxón entre los 12,600 y los 12,400 cal AP.

De los 12,100 a los 7,160 años cal AP se presenta un hiato en la secuencia sedimentaria (Figuras 9-11), por lo cual no se tiene registro de las comunidades vegetales de este periodo. Ortega-Guerrero *et al.*, (en revisión) proponen que este hiato puede deberse a la erosión en la orilla del lago causada por una disminución en el nivel lacustre que pudo estar relacionada con una señal climática de menor humedad en comparación con las condiciones actuales. Posteriormente, a los 7,160 cal AP se restablece la sedimentación.

De los 7,160 a los 3,700 años cal AP de manera general, el lago de Zirahuén estuvo caracterizado por la presencia de un bosque de pino-encino el cual presentaba un estrato arbóreo bien definido de *Alnus* con algunos elementos de bosque mesófilo de montaña (*Abies*, *Salix*, *Tilia*, *Celtis* y *Carpinus*) aunque en porcentajes bajos (siempre $<3\%$) de la suma de polen arbórea total. Particularmente, a los 6,660 cal AP no se tiene registro de *Pinus* sino que el bosque presentaba únicamente *Quercus* y *Alnus*. Además, se registra un incremento en los porcentajes de *Abies*, *Tilia* y *Carpinus*. Posteriormente para los 6,520 cal AP, el pino se restablece presentando abundancias similares a *Quercus* y *Alnus* hasta el final de este intervalo de tiempo.

En la actualidad se ha observado que los bosques de pino son codominantes con otros árboles tales como *Alnus*, *Quercus* y otras especies de coníferas tales como *Abies* y *Juniperus* (Velázquez *et al.*, 2000). Rzedowski y Mcvaugh (1996) plantean que los disturbios debidos al fuego en los bosques de pino favorece el establecimiento de coníferas. Sin embargo, Sánchez y Hugué (1959) mostraron que el fuego induce la sucesión hacia pino-aliso-pasto. La reducción de *Pinus* coincide con un incremento en las poblaciones de *Quercus* y *Alnus* así como en el incremento de las herbáceas y las pteridofitas. Esto a su vez coincide con un aumento en la concentración de partículas de carbón posiblemente relacionada al depósito de la tefra 4 el cual posiblemente sirvió como sustrato para la colonización y la expansión de las comunidades de *Alnus*.

Dentro del lago, la comunidad de plantas acuáticas presenta una reducción en la concentración de microesporas de *Isoetes* tipo 1 en comparación con los intervalos anteriores. Además, tanto la diversidad como la abundancia de otras acuáticas es muy baja a lo largo de este periodo. Aunado a lo anterior, se registra la presencia (con bajos valores) de *Isoetes* tipo 2 (Figura 10).

Durante este tiempo, el grupo de las algas presenta importantes cambios que podrían estar relacionadas con fluctuaciones en el estado trófico del lago. Al principio del periodo, a los 7,160 cal AP *Pediastrum* continúa dominando el lago, sin embargo, cabe señalar que esta dominancia está acompañada de *Scenedemus*, el cual presenta una abundancia ligeramente menor a la de *Pediastrum*. Por otro lado a partir de dicha edad estos dos géneros disminuyen fuertemente y su presencia se hace muy baja a lo largo del resto de periodo. *Botryococcus* se encuentra presente constantemente a lo largo de este intervalo de tiempo y comienza a incrementar a medida que *Pediastrum* reduce su abundancia. Cabe señalar que existe *Coelastrum* en algunos puntos de este intervalo y que a diferencia de *Pediastrum* puede presentar abundancias altas o iguales junto con *Botryococcus*. Hutchinson (1967) lista a *Pediastrum* y *Scenedemus* como los dominantes usuales de lagos eutróficos. Es posible que en este punto el lago haya conservado su estado eutrófico el cual permitió a su vez el establecimiento de la cianobacteria *Gloeotrichia* aff. *echinulata* registrada en el entre los 6,866 y los 6,780 cal AP (Figura 10), mismo que se encuentra indicado por los diagramas de ordenación ACC de los palinomorfos acuáticos (Figuras 15 y 16) el cual relaciona las muestras de este periodo y a *Gloeotrichia* aff. *echinulata* con el vector COT.

Es de gran importancia la presencia de *Gloeotrichia* aff. *echinulata* ya que, por ser una cianobacteria es un organismo fijador de nitrógeno (van Geel, 2001). Tiene dos estadios de vida:

bentónico, durante el cual crece entre los sedimentos de los cuales toma fósforo que posteriormente utiliza durante su estadio planctónico para flotar y migrar dentro de la columna de agua (Head *et al.*, 1999; Tymowski y Duthie, 2000). A medida que *Gloeotrichia* aff. *echinulata* se convierte en planctónica, ésta puede transportar nutrientes desde los sedimentos hacia la columna de agua (Istvanovics *et al.*, 1993).

Los valores en la susceptibilidad magnética continúan siendo bajos ($<1\mu\text{m}^3/\text{kg}$) (Figura 12). Sin embargo, se tienen el depósito de la tefra 5 (6,970-6,824 cal AP.) la cual posiblemente haya generado un cambio en la química del lago influenciando para la permanencia tanto de *Gloeotrichia* como de *Botryococcus*, *Coelastrum* y *Pediastrum*. Posiblemente, también ésta influyó sobre la comunidad de *Isöetes* tipo 1 ya que posterior a su depósito se observa una baja en la abundancia de este helecho.

Por otro lado, el registro de diatomeas que abarca de los 7,240 a 3,900 cal AP señala el desarrollo de un lago más profundo y más eutrófico que durante las fases previas a ésta. Esto debido a que existe un cambio muy marcado en la asociación de estos organismos en donde *Aulacoseira ambigua* var. *robusta* incrementa arriba del 90% sobre *Fragilaria construens* y *Ulnaria ulna* que presentan abundancias muy bajas (Figura 14). Se tienen referencias ecológicas de que *Aulacoseira* sp es tolerante a la alta disponibilidad de fósforo (Kilham *et al.*, 1986); esto coincide con los requerimientos de *Gloeotrichia* aff. *echinulata* pues este organismo lo requiere en grandes cantidades para su desarrollo (Karlsson-Elfgren, 2003). Cabe señalar que la profundización del lago pudo deberse, según Ortega-Guerrero *et al.* (en revisión) al depósito de los flujos de lava de la Magueyera (FLLM) quienes a pesar de la incertidumbre de su edad (6560 ± 950 años) (Figuras 1 y 3), sugieren que dicho evento volcánico afectó la morfología de la cuenca; reduciendo su extensión, pero, aumentando su volumen de agua, contribuyendo al aumento de la profundidad en el lago, después del posible periodo de erosión ya mencionado. Sin embargo, este aumento en el nivel lacustre se encuentra acompañado de un incremento en la humedad reflejado por la modificación en las comunidades arbóreas alrededor del lago, lo cual indicaría un cambio en las condiciones climáticas.

Es posible que la humedad durante el intervalo que va de los 7,100 a los 3,600 cal AP haya sido mayor con respecto periodo anterior y que ésta haya ido incrementándose a lo largo del periodo. El incremento de humedad pudo haber sido favorable para el establecimiento de un proceso de maduración de zonas boscosas de *Quercus* y de *Alnus*. Puesto que se registra un incremento en el nivel lacustre (alrededor de 12 a 18 m de profundidad de acuerdo con los datos reportados por Bernal-Brooks y MacCrimmon, 2000 a y b) posiblemente, a partir de este periodo, la disminución en los porcentajes de polen de *Pinus* reflejen su migración hacia partes

más elevadas de la cuenca para alcanzar posteriormente su posición actual en la cuenca de Zirahuén. El incremento gradual en la humedad podría explicar la presencia desigual a lo largo de este periodo de los géneros aunque en abundancias más bajas de *Abies*, *Salix*, *Tilia*, *Celtis* y *Carpinus* los cuales actualmente se presentan como constituyentes de los restos de bosque mesófilo de montaña registrados principalmente en cañadas y en zonas más húmedas para Zirahuén por Pérez-Calix (1996).

Además, el incremento en la humedad pudo influenciar directamente a las comunidades de organismos dentro del lago debido al aumento en el nivel, ocasionando un decremento en la población de *Isoetes* tipo 1, pero favoreciendo el desarrollo de *Aulacoseira ambigua* var. *robusta*. Ortega-Guerrero *et al.* (en revisión) sugieren que la eutroficación registrada por la asociación de diatomeas, los altos valores de COT así como la disminución en la relación C/N (Figuras 13 y 14), pudieron deberse al incremento en el aporte de la vegetación terrestre a los sedimentos del lago que podría relacionarse con la expansión de la comunidad de *Alnus* alrededor del lago ya que estudios llevados a cabo por Goldman (1961) y Engstrom *et al.* (2000) han mostrado que la fijación de nitrógeno atmosférico (N₂) realizada por *Alnus* puede incrementar en gran medida la productividad primaria y acelerar el ciclo del nitrógeno en los sistemas terrestres y en los sistemas acuáticos adyacentes. Asimismo, Sheng Hu *et al.* (2001) exponen los efectos de la expansión de *Alnus* para el Holoceno medio sobre la productividad acuática, el ciclo del N y el desarrollo del suelo en el lago Grandfather en Alaska. Estos autores documentan un incremento en los porcentajes del polen *Alnus* (de 10-70%) en mesetas de montañas y zonas riparias de la región del lago Grandfather de 8,000-7,000 cal AP y sugieren una rápida expansión del *Alnus* en esta zona. Mencionan que este cambio en la vegetación a su vez coincide con el incremento de los valores (20.4-106.2 mg/g) del contenido de sílice biogénico, indicando un incremento en la productividad de las diatomeas dentro del lago como un resultado de la fijación de N₂ por parte del *Alnus* en los suelos que rodean el lago y por consiguiente en el flujo de nitrógeno hacia el lago como resultado de los procesos de erosión de estos suelos. Sheng Hu *et al.* (2001) concluyen que la productividad acuática en este tiempo (8,000-7,000 años AP de ¹⁴C) se encuentra marcada por un incremento en los porcentajes de carbono orgánico y de nitrógeno y los valores de δ¹³C en los sedimentos incrementan sustancialmente con el establecimiento de *Alnus* sugiriendo un aumento en la disponibilidad de nitrógeno y una aceleración en el ciclo de N dentro del lago y alrededor de éste (Sheng Hu *et al.*, 2001). Proponemos que algo similar pudo ocurrir en Zirahuén.

Al igual que el periodo anterior, el ACC marca que la mayor parte de las muestras de este intervalo temporal se relacionan más con el vector COT (tanto los taxa acuáticos como los terrestres). Debido a la diversidad de las algas representadas por *Pediastrum*, *Scenedesmus*,

Botryococcus y *Gloeotrichia* aff. *echinulata* la relación con la variable COT podría indicar que la producción primaria, dentro del lago durante este tiempo, aumentó originando un lago de condiciones más eutróficas lo cual a su vez pudo estar relacionado con el establecimiento de la diatomea *Aulacoseira ambigua* var. *robusta*. Además, el diagrama de ordenación de los taxa de polen terrestre señala que para este intervalo de tiempo hubo una expansión en las comunidades de *Alnus* alrededor del lago lo cual pudo haber acelerado la producción primaria dentro del lago debido a la fijación de nitrógeno llevada a cabo por éste. Además el aumento de taxa mesofíticos tales como *Carpinus*, *Tilia*, *Abies*, *Celtis* y *Fraxinus* también relacionados con este vector podría indicar un periodo de mayor humedad.

De los 3,700 a los 1,400 años cal AP se observa una reducción de *Quercus* y *Alnus* la cual va acompañada con incremento en las herbáceas (Figura, 11) y en las pteridofitas las cuales son abundantes sobre todo en el periodo que va de los 2,664 a los 2,138 cal AP. Los valores de las tasa de cambio para este periodo van de 0.4 a 0.6. Esta reducción en las comunidades de *Alnus* también es registrada por Watts Bradbury (1982) en Pátzcuaro y por Xelhuntzi (1991) en Zacapu, lo cual podría ser un indicador de una tendencia regional hacia condiciones más secas.

Posteriormente, la aparición de *Zea* y de la especie *Zea mays* a los 3,560 años cal AP (Figura 9 y 11) marca el inicio de la agricultura alrededor de la cuenca. Las primeras actividades de agricultura debieron implicar el desarrollo de incendios alrededor del lago lo cual coincide con una alta concentración de partículas de carbón registradas en este periodo; esto pudo haber originado entonces, cambios en la vegetación local y posiblemente regional.

Dentro del lago la baja diversidad de algas (*Botryococcus*, *Concentricistis*, *Pediastrum* y *Scenedesmus*) nos hace suponer que en el lago la producción primaria disminuyó y dado a que no todas se registran a la misma edad, esto podría indicar fluctuaciones en el estado trófico del lago.

En este intervalo de tiempo se observan valores altos de susceptibilidad magnética ($6 \mu\text{m}^3/\text{kg}$ en promedio) así como de los elementos Al, Ti, Fe, Ca y K (Figura 12) lo cual sugiere un incremento en la erosión alrededor del lago que coincide con la aparición *Zea mays*.

Por otra parte, la asociación de diatomeas propuesta para el intervalo que de los 3,900 a los 1,400 cal AP (2000BC-AD570) (Figura, 14) señalan una reducción en *A. ambigua* var. *robusta* la cual se encuentra ahora asociada a *Fragilaria construens*, *Ulnaria ulna* y *Diploneis elliptica*. Esta asociación sugiere niveles lacustres generalmente más bajos que los registrados

anteriormente. Los altos valores en la susceptibilidad magnética pueden indicar una intensa erosión hídrica; debido a que el suelo se encontraba más expuesto (reflejado por la baja cobertura arbórea y el incremento en los porcentajes de polen de herbáceas), aunque hayan existido condiciones de mayor sequía o de menos precipitación, las lluvias ocasionales o torrenciales pudieron haber tenido una fuerte capacidad erosiva (Ortega-Guerrero, com pers.). Por otro lado, la abundancia de *Diploneis elliptica* también sugiere concentraciones iónicas más altas en el agua del lago; esto es consistente con los valores más altos de CIT (Ortega-Guerrero *et al.*, en revisión) (Figura 13) lo cual podría sustentar que el estado trófico del lago fluctuó.

De los 1,400 años cal AP al presente el registro palinológico señala la presencia de un bosque de pino-encino con algunos elementos de *Alnus*, *Salix*, *Tilia* y *Carpinus*. El sotobosque está representado por una abundancia y diversidad de herbáceas. Las cuales pueden ser parte de los procesos de sucesión originados por los disturbios llevados a cabo alrededor de la cuenca.

Dentro del lago hay una baja diversidad de algas pero una abundancia nunca antes observada en el registro de *Coelastrum* y *Staurastrum* indicando condiciones eutróficas dentro del lago. El cladóceros *Bosminia longirostris* es abundante a lo largo del periodo. Este tipo de organismos son importantes ya que son un constituyente importante de las comunidades del zooplancton de los lagos debido a su capacidad de filtrar partículas, incluyendo bacterias, protozoarios, detritos y algas (Lampert, 1978; De Bernardi *et al.*, 1987; Greenwood *et al.*, 1999; Hülsmann, 2001) y su presencia puede indicar una tendencia de eutrofización dentro del lago.

Al principio del periodo (1,400 años cal AP-550 AD) se observa un intervalo corto con valores bajos en la susceptibilidad magnética (Figura 12); esta baja puede ser atribuida a la presencia de un clima más seco. Sin embargo, a partir de este periodo, los procesos erosivos incrementan nuevamente; sobre todo después de los 1000 años cal AP (950 AD) al igual que los elementos Al, Ti, Fe y K (Ortega-Guerrero *et al.*, en revisión) sugiriendo un aumento en la erosión y en la entrada de sedimentos al lago. La abundancia de diatomeas coincide con la relación Si/Ti sugiriendo que el sílice presente en los sedimentos es de origen orgánico.

La asociación de diatomeas de los 1,400 años al presente es muy similar a la reportada para el periodo de anterior. Está representada por *A. ambigua* var. *robusta*, *Fragilaria construens*, *Ulnaria ulna* y *Cocconeis placentula* (Figura 14). Ésta, sugiere condiciones similares a las del periodo anterior (3,900 a 1,400 cal AP), pero bajo un escenario de entrada reducida de sedimento al lago indicado por los valores bajos de la susceptibilidad magnética, en la abundancia de diatomeas y los bajos valores de Ti al principio de este intervalo de tiempo.

A partir de los 950 años cal AP (1000AD) se registra una reducción en *A. ambigua* var. *robusta* la cual abre camino a la asociación de *F. construens*, *D. elíptica* y *Ulnaria ulna* (ca. AD1000-1240). Sin embargo, a partir de los 710 años cal AP (1240 AD) hay un incremento en los valores de la susceptibilidad magnética del Ti y la abundancia de diatomeas decrece y cambia a una asociación compuesta por *D. elíptica*, *Cyclotella pseudostelligera*, *Ulnaria ulna*, *Navicula cryptocephala* y *Nitzschia amphibia*.

La secuencia de cambios en las asociaciones de diatomeas arriba de los 950 años cal AP (1000 AD) está caracterizada por un incremento de taxa perifíticos y sugiere una transición a aguas más someras y más concentradas; donde un florecimiento de *Hantzschia amphioxys* a los 1945 AD (0.18-0.15m) podría reflejar una fase corta de niveles lacustres incluso más someros y/o el impacto de la tefra del Parícutín en el lago. Esta baja en el nivel lacustre coincide con el documentado después de los 1942 AD por Bernal-Brooks y McCrimmon (2000a). Posteriormente, en la cima del núcleo (0.10 m) (ca. 30 años), la asociación moderna está dominada por el establecimiento de la planctónica *Cyclotella ocellata* (Ortega-Guerrero *et al.*, en revisión). Davies *et al.*, (2004) interpreta la aparición de *Cyclotella ocellata* como una señal en el incremento en los niveles de nutrientes en el lago y por consiguiente la eutroficación de éste mismo que coincide con el incremento en los porcentajes de las algas *Coelastrum* y *Staurastrum*.

El ACC señala que para los dos últimos periodos de tiempo (3,700 a 1,400 cal AP y 1,400 al presente) las muestras se relacionan con los vectores de susceptibilidad magnética y concentración de partículas de carbón (Figuras 15-18). El diagrama de los taxa de polen terrestre señala que el incremento en herbáceas y la aparición de maíz se relacionan con la susceptibilidad magnética. Las prácticas de agricultura llevadas a cabo por los primeros pobladores consistían en la quema de bosque para abrir áreas de cultivo; esto a su vez originaba la pérdida de la cobertura arbórea lo cual provoca incremento en los procesos de erosión hacia el lago. Asimismo, este incremento en los procesos de erosión pudieron incrementar la cantidad de minerales y de nutrientes entrante al lago desatando el proceso de eutroficación moderno indicado por el incremento en los porcentajes de *Coelastrum* y de *Cyclotella ocellata* (ca. 30 años).

	EDAD años cal AP	GEOQUÍMICA (Ortega-Guerrero <i>et al.</i> , 2009)	TIPO DE VEGETACIÓN / CONDICIONES CLIMÁTICAS INFERIDAS	ASOCIACIÓN DIATOMEAS (Ortega-Guerrero <i>et al.</i> , 2009)	NIVEL LACUSTRE
Holoceno tardío	0				
	1,000	Erosión alta (6µm ³ /kg)	Bosque pino-encino > herbáceas > pteridofitas condiciones secas	<i>Cyclotella ocellata</i> <i>Hantzschia amphioxys</i>	Reducción eutrófico
Holoceno temprano-medio	2,000	Altos valores Al, Ti, Fe, Ca y K	< <i>Quercus</i> < <i>Alnus</i>	< <i>A. ambigua</i> var. <i>robusta</i>	Reducción
	3,000	3020 cal AP Aumenta erosión	> herbáceas <i>Zea mays</i> (3,527 años cal AP) condiciones > secas	> <i>Diploneis elliptica</i>	
	4,000	3,900 cal AP > COT y < C/N	Bosque pino-encino, <i>Alnus</i> , Elementos de bosque mesófilo	> <i>A. ambigua</i> var. <i>robusta</i>	Profundo y eutrófico
	5,000	Se restablece la sedimentación	< <i>Isoetes</i> tipo 1	con <i>Ulnaria ulna</i> y <i>Fragilaria construens</i>	
	6,000	X baja (<1µm ³ /kg) LFLM	<i>Gloetrichia</i> aff. <i>echinulata</i> condiciones > húmedas presente		
	7,000	6560±950 años			
HIATO	8,000				
	9,000				
	10,000				
	11,000				
	12,000				
Pleistoceno tardío	13,000	X baja (<1µm ³ /kg) > COT, < C/N	Bosque pino-encino, <i>Alnus</i> ; > hierbas < <i>Isoetes</i> tipo 1 > Humedad	< <i>Cocconeis placentula</i> > <i>U. ulna</i> , <i>F. construens</i> y <i>C. ocellata</i>	Incremento gradual profundidad
	14,000	13,500 cal AP			
	15,000	X baja (<1µm ³ /kg)	Bosque de pino > Frías < húmedas <i>Isoetes</i> tipo 1 que el presente	> taxa litorales epifíticos > <i>Cocconeis placentula</i> < <i>U. ulna</i> , <i>A. ambigua</i> var. <i>robusta</i>	Somero dulce < alcalino
	16,000				
	17,000				

Figura 19. Se muestra una síntesis de las condiciones climáticas inferidas para los últimos 17,000 en Zirahuén. Se señalan los cambios más importantes en el tipo de vegetación, susceptibilidad magnética, asociaciones de diatomeas y nivel lacustre para la secuencia sedimentaria ZIR03-I. Estos cambios se muestran para los periodos: Pleistoceno tardío, Holoceno medio temprano y Holoceno tardío. Se ilustra el hiato sedimentario registrado para el intervalo 12,100-7,160 años cal AP. Los datos de geoquímica, de asociación de diatomeas y de niveles lacustres se tomaron de Ortega-Guerrero *et al.*, (en revisión).

**Comparación de la secuencia ZIR03-I con el registro de los lagos cercanos:
Pátzcuaro, Zacapu y Cuitzeo.**

Desde una perspectiva regional, los cambios ambientales de los últimos miles de años afectaron a las cuencas y a los lagos que se localizan en la porción occidental de la FVTM tanto a Zirahuén como Pátzcuaro, Zacapu y Cuitzeo. Hay disponibles registros paleoecológicos de todos estos sitios los cuales permiten comparar temporalmente las fluctuaciones en los niveles lacustres así como los cambios en la vegetación asociados al cambio climático del Plioceno tardío y el Holoceno. En la tabla 7 se presentan las características actuales y en la figura 20 se sintetiza la reconstrucción que distintos autores presentan para dichos sitios. El clima predominante es templado subhúmedo pero hay diferencias en la altitud siendo la zona más alta Zirahuén y la más baja la región del lago de Cuitzeo.

	Zirahuén	Pátzcuaro	Zacapu	Cuitzeo
Área del cuerpo lacustre	10.48 km ²	130 km ²	261 km ²	420 km ²
Cotas altitudinales alcanzadas en la cuenca (m.s.n.m.)	2,075-3,300	2,033-3,000	1,900-1990	2250-3590
Altitud del cuerpo lacustre (m.s.n.m.)	2,075	2,035	1,980	1,820
Precipitación media anual (mm)	1,234	950	800	700
Promedio de Temperatura anual	16.1 °C	16.3 °C	16.6 °C	17.8 °C
Profundidad (m)	40	19	14	2.5
Clima	Templado subhúmedo con lluvias en verano	Templado subhúmedo con lluvias en verano	Templado subhúmedo con lluvias en verano	Templado subhúmedo a seco

Tabla 7. Características actuales de los lagos de Zirahuén, Pátzcuaro, Zacapu y Cuitzeo.

A continuación se presenta una comparación de los cambios paleoambientales que se reconstruyen para Zirahuén con los demás sitios.

El Pleistoceno tardío en el lago de Pátzcuaro según Bradbury y Watts (1982) y Bradbury (2000) estuvo caracterizado por condiciones más frías y más húmedas que las del presente debido a la abundancia dentro del registro palinológico regional de polen de *Pinus*, *Quercus*, *Alnus*, y *Juniperus*, y a la abundancia dentro del registro local de microesporas de *Isoetes*. Los altos porcentajes de diatomeas planctónicas (*Aulacoseira* y *Stephanodiscus*)

indicadoras de niveles lacustres profundos (37,000 a 11,000 cal AP). El registro palinológico del lago de Zirahuén señala que durante el periodo de 17,000 a 13,500 cal AP la vegetación regional estuvo caracterizada casi en su totalidad por polen de *Pinus* mientras que la vegetación local estuvo dominada por las microesporas y megasporas del helecho acuático *Isoetes* tipo 1 indicando condiciones más secas y menos húmedas que en el presente, mismo, que se encuentra sustentado por la asociación de diatomeas litorales epifíticas (*Cocconeis placentula* principalmente) para este intervalo la cual indica el establecimiento de una lago somero, dulce y menos alcalino. A partir de los 13,500 hasta los 12,100 cal AP la vegetación regional del lago de Zirahuén muestra un cambio en cuanto a su composición con el incremento en los porcentajes de polen de *Pinus*, *Quercus* y *Alnus*, mientras que en la vegetación local se observa una disminución notoria tanto en las microesporas como en las megasporas de *Isoetes* tipo 1 que podría indicar condiciones de mayor humedad. Asimismo, el lago señala una disminución en la diatomea *Cocconeis placentula* acompañada del incremento de las especies *U. ulna*, *F. construens* y *C. ocellata* señalando un incremento gradual en la profundidad del lago.

En Cuitzeo, la estratigrafía de la secuencia sedimentaria señala una sedimentación muy baja entre 21,000 y 10,000 cal AP lo cual posiblemente refleje la presencia de una hiato en la sedimentación, asociado a ambientes lacustres someros; indicativos de condiciones secas (Velázquez-Durán, 2003). Para el lago Zacapu Metcalfe (1992) y Ortega-Guerrero *et al.* (2002) reportan que entre 18,000 y 15,000 cal AP, la cronología es pobre y registran evidencias de actividad volcánica. El registro de diatomeas indica niveles lacustres bajos y la disminución de carbono orgánico y la susceptibilidad magnética sugieren condiciones particularmente secas después de los 16,500 cal AP, mismas que persisten hasta los 5,500 cal AP.

La transición Pleistoceno-Holoceno en el lago de Pátzcuaro se caracteriza por fluctuaciones en el nivel lacustre y en el estado trófico del lago. El registro palinológico señala una disminución en el polen de *Juniperus* y un incremento en los porcentajes de *Artemisia* y *Ambrosia* (Bradbury, 2000). Los registros de Cuitzeo y Zirahuén presentan hiatos sedimentarios y las condiciones sugeridas para Zacapu son particularmente secas de 16,500 a 5,500 cal AP.

El Holoceno temprano-medio del lago de Pátzcuaro está caracterizado por la ausencia total de polen de *Juniperus* y por un incremento en los porcentajes de *Artemisia* y *Ambrosia* acompañado de una baja en los porcentajes de polen de *Pinus*, *Quercus* y *Alnus* (Watts y Bradbury, 1983; Bradbury, 2000). El lago registra fluctuaciones entre las diatomeas *A. ambigua* y especies de *Fragilaria*, y es hasta los 5,000 cal AP que la abundancia del género *Synedra* refleja condiciones más secas.

El lago de Zirahuén presenta su fase más húmeda (7,160-3,600 cal AP) representada por una expansión de bosques de pino-encino, *Alnus* y de elementos mesofíticos alrededor del lago indicando condiciones más húmedas que las actuales. Esto se encuentra relacionado con la aparición de *Gloeotrichia* aff. *echinulata* y por la dominancia de la diatomea *Aulacoseira ambigua* var. *robusta* sugiriendo el desarrollo de un lago muy profundo y eutrófico. Un punto importante para el registro palinológico de Zirahuén, es la disminución de los porcentajes de *Alnus* registrada a los 6,600 cal AP.

El lago de Cuitzeo señala la expansión de bosques templados asociados a climas templados subhúmedos a partir de los 10,000 años cal AP (Velázquez-Durán, 2003) y la presencia de la diatomea *Cyclotella meneghiniana* indica la presencia de una lago somero y turbio. Para el lago de Zacapu Metcalfe (1992) y Ortega-Guerrero *et al.* (2002) señalan condiciones secas al principio del Holoceno que perduran hasta los 5,500 cal AP; sin embargo, Xelhuantzi (1991), sugiere condiciones templadas subúmedas entre 9,000 y 8,200 cal AP por la presencia de bosques densos de pino-encino y *Alnus*. Posteriormente, estas condiciones tornan a templadas semisecas a partir de los 8,200 cal AP y perduran hasta 5,400 cal AP debido a la sucesión de plantas acuáticas (*Typha* a Cyperaceae) registrada así como por el incremento de plantas oportunistas (en su mayoría Cheno-Am.) y por la fuerte disminución en el polen de *Alnus*.

El Holoceno tardío en Pátzcuaro señala un incremento en el polen de *Ambrosia*, *Artemisia* y Cheno-Am., y la disminución considerables de *Alnus* a los 4,000 cal AP mismo que coincide con el reporte de *Zea mays*. Las fluctuaciones en la asociación de diatomeas indica niveles lacustres bajos y una tendencia hacia condiciones menos húmedas; documentado también por las presencia de capas de ostrácodos (sobre todo para el intervalo de 4,600 a 3,800 cal AP) y por los valores altos de calcio (Bradbury, 2000). En el lago de Zirahuén se registra un incremento muy notorio de polen de herbáceas y de pteridofitas a partir de los 3,600 cal AP acompañada de una fuerte reducción en los porcentajes de *Alnus* (a los 3,800 cal AP) y la aparición de *Zea mays* a los 3,560 cal AP. Las fluctuaciones en la asociación de diatomeas sugerida y previamente explicada por Ortega-Guerrero *et al.*(en revisión) señala una baja en el nivel lacustre. El lago de Cuitzeo presenta el cambio más notorio alrededor de los últimos 900 años calAP donde Velázquez (2003) registra la presencia de la planta acuática enraizada *Potamogeton* que indica la entrada de terrígenos al lago; evidencia que coincide con un aumento en los porcentajes de Cheno-Am., Asteraceae y Poaceae los cuales se relacionan con una fase de actividades antrópicas o una fase de clima seco. Además, registra para este tiempo un aumento en las diatomeas perifíticas *Nitzschia*, *Amphora*, *Anomoeoneis* y *Navicula* y las relaciona a aguas bajas con una alta concentración iónica y de mayor turbidez. Finalmente en el lago de

Zacapu se documenta una recuperación arbórea de 5,400 a 2,700 cal AP marcado por el incremento de polen de *Pinus*, *Quercus*, *Alnus* y *Arenaria* que se interpreta como un incremento en la precipitación pluvial por consiguiente en el nivel lacustre indicando condiciones templada semihúmedas las cuales a partir de los 2,700 cal AP se tornan hacia condicione templadas semisecas por el incremento nuevamente de polen de Chen-Am., como consecuencia, originando una baja nuevamente en el nivel lacustre (Xelhuatnzi, 1991).

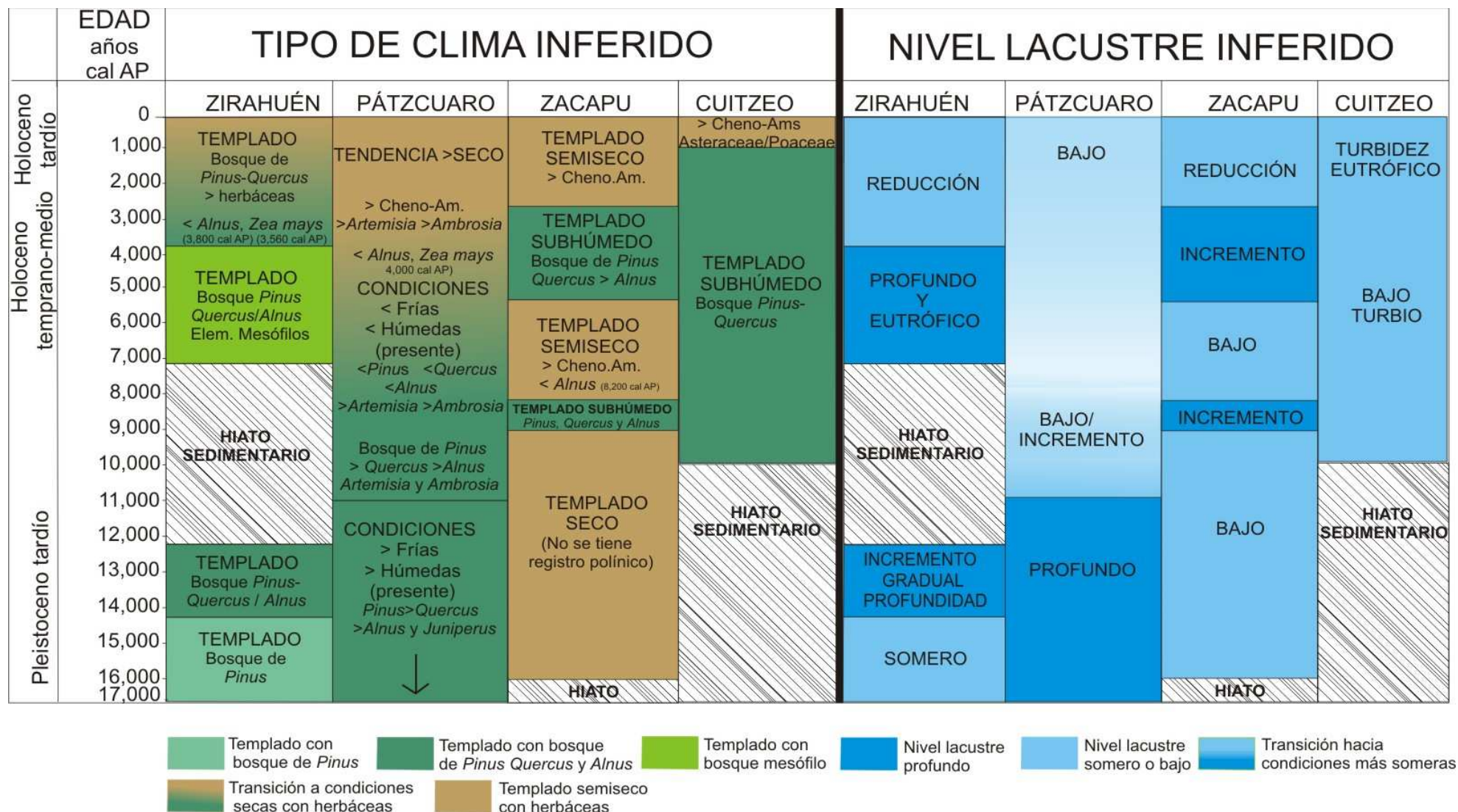


Figura 20. Se ilustra una comparación entre los lagos Zirahuén, Pátzcuaro, Zacapu y Cuitzeo para los últimos 17,000. Se representa las condiciones climáticas inferida para estos cuatro lagos con base en el registro palinológico (Bradbury y Watts, 1982; Xelhuantzi, 1991y Velázquez, 2003) mencionado previamente en este trabajo así como los niveles lacustres (Metcalf, 1992; Bradbury, 1997; Ortega-Guerrero *et al.*, 2002; Ortega-Guerrero *et al.*, en revisión e Irade *et al.*, 2002).

Implicaciones Pleoclimáticas

Las evidencias palinológicas presentadas en este trabajo y las presentadas por Ortega-Guerrero *et al.* (en revisión) sugieren que las condiciones climáticas en el lago de Zirahuén para el periodo 17,000 a 15,200 cal AP eran más frías y menos húmedas que en el presente, las cuales presentaron un ligero incremento en la humedad entre 15,200 y 12,100 cal AP marcado por un ligero incremento en el nivel lacustre y un cambio en la vegetación arbórea. Como ya se mencionó anteriormente, este cambio estuvo caracterizado por el desarrollo de un bosque bosque de pino-encino con un estrato bien definido de *Alnus* y de algunos elementos mesófilos de montaña tales como *Abies* y *Salix*, así como un incremento en la abundancia de diatomeas planctónicas.

Bradbury (1997; 2000) sugiere que durante el UMG la precipitación invernal originada por los vientos del oeste, dominó el centro occidental del país provocando un incremento en los niveles lacustres del Lago de Pátzcuaro y concluye que este lago se encontraba bajo la influencia de la humedad proveniente del oeste durante ese periodo mientras que lugares al centro-este del país, que actualmente están bajo la influencia de los vientos alisios, durante el UMG fueron secos debido a que esta fuente de humedad era inefectiva. Sin embargo, la idea de Bradbury (1997; 2000) acerca de un incremento en la precipitación invernal no concuerda con el nivel lacustre bajo registrado en Zirahuén (17,000-12,100 cal AP), ni con los registros que se tienen para Zacapu y Cuitzeo los cuales marcan condiciones relativamente secas durante el UMG; indicado por las discontinuidades en la sedimentación lacustre entre los 21,000 y los 10,000 cal AP en Cuitzeo (Ortega *et al.*, 2002; Israde *et al.*, 2002) y por los bajos niveles lacustres en Zacapu hasta los 10,000 cal AP (Metcalf, 1995). Además, estas condiciones también se encuentran registradas en las cuencas Lerma y Chalco (Caballero y Ortega, 1998; Lozano y Ortega, 1998; Sosa, 2001; Caballero *et al.*, 2002; Lozano *et al.*, 2005).

Por otro lado, Caballero *et al.* (en revisión) documentan que durante el UMG (22,000 a 18,000 cal AP), la ALE (denominada línea de las nieves; en inglés ALE) de los glaciares de montaña se encontraban menor altitud en montañas cercanas a las costas como los volcanes Tancítaro y Cofre de Perote que en el Iztaccíhuatl, que es una montaña <1000 m más alta situada en el interior del Altiplano Central Mexicano. Los autores asumen que el principal control de los glaciares es la temperatura y que durante el UMG (22,000 a 18,000 cal AP) las temperaturas se encontraban abatidas de manera similar en toda la región del centro de México. Proponen que tales variaciones en la ALE se debieron al establecimiento de un gradiente de precipitación de las costas hacia el interior del país. Por ello los glaciares en montañas del interior como el Iztaccíhuatl no descendían tanto como en las montañas con mayor influencia marítima. Así, la menor altitud de la ALE en el Tacítaro ($3,390 \pm 50$ m.s.n.m.) localizado en el

sector occidental, respecto al Cofre de Perote ($3,650 \pm 40$ m.s.n.m.) localizado en la porción oriental de la FVTM sugiere mayor aporte de humedad desde el Pacífico que desde el golfo de México durante este periodo de tiempo. Este gradiente de precipitación podría estar en concordancia con lo propuesto por Bradbury (1997; 2000) quien documenta para Pátzcuaro niveles lacustres altos y condiciones más frías y más húmedas que las del presente para el intervalo 48,000-10,000 cal AP (dentro del cual se encuentra registrado el UMG) lo cual sería concordante con el descenso de la ALE registrada en el Tancítaro. Sin embargo, la hipótesis de Bradbury no explica las condiciones secas que prevalecieron en la cuenca de Zacapu y las bajas tasas de sedimentación en el Lago de Cuitzeo entre 21,000 y 10,000 años cal AP y tampoco explicaría las condiciones secas registradas para el glacial tardío de Zirahuén para el intervalo que va de los 17,000-15,200 cal AP.

Asimismo, Caballero *et al.* (en revisión) mencionan que durante el glacial tardío (GTA) (18,000-15,000 años cal AP) los glaciares de montañas cercanas a la costa se mantuvieron en posiciones similares a las del UMG, mientras que al interior del país tales como el Iztaccíhuatl, se contrajeron ligeramente; indicado por un ascenso en la ALE de aproximadamente 100 m lo cual pudo haber sido por una intensificación en el gradiente de humedad de las costas hacia el interior del país, tal vez acompañado de un ligero aumento en la temperatura de aproximadamente 1°C . Del mismo modo, mencionan que durante el GTA la señal polínica es similar a la del UMG en los lagos del centro de México. Sin embargo, las señales climáticas parecen diferir entre los lagos del centro de México ya que mientras los registros del Alto Lerma (Chignahuapan) y Chalco indican un ligero incremento en el nivel lacustre, los lagos de Cuitzeo, Texcoco y Tecocomulco presentan hiatos de sedimentación durante este tiempo los cuales podrían estar reflejados con condiciones de sequía, mismas que se encuentran registradas en la secuencia ZIR03-I representados por un bosque con concentraciones muy bajas de polen arbóreo (*Pinus*) y por un lago somero dominado por comunidades de *Isoetes* tipo 1 y por taxa de diatomeas epifíticas.

Por otro lado, el glacial terminal (GTE) (15,000-12,000 cal AP) cambios significativos dado que los glaciares en todas las montañas se encuentran en retroceso, reflejando un incremento en la temperatura cercano a 2°C durante este lapso. En la señal polínica identifican que en las comunidades de plantas de los lagos estudiados por estos autores (Tecocomulco, Texcoco, Chalco, Cuenca del Alto Lerma, Cuitzeo, Zacapu y Pátzcuaro) presentan una expansión en los bosques que probablemente está relacionada con la migración a mayores altitudes de esta comunidad en respuesta al incremento en la temperatura Caballero *et al.* (en revisión). Esto también se observa en el registro de ZIR03-I como un cambio hacia bosques de pino-encino con abundante *Alnus* y algunos elementos de bosque mesófilo de montaña

reportados para este trabajo. Además, Zirahuén presenta altos niveles lacustres para este periodo a diferencia de otros registros del centro de México reportados por Caballero *et al.* (en revisión) y de Pátzcuaro que registran una reducción en el nivel lacustre entre los 12,000 y los 11,000 cal AP (Bradbury, 2000). Esto es interpretado por Bradbury (2000) como una disminución de las lluvias de invierno debido a la migración hacia el norte de los vientos del oeste y el gradual establecimiento de los climas modernos con lluvia estival asociada a los vientos alisios. Así el establecimiento gradual de los climas modernos podría explicar el incremento gradual en la humedad en Zirahuén registrado para este intervalo, durante el cual, los vientos alisios pudieron transportar mayor humedad desde el golfo de México y el Caribe conforme la Zona Intertropical de Convergencia (ZITC) se desplazaba hacia el norte del ecuador. Sin embargo, tanto el registro de Zacapu como el de Cuitzeo mantienen niveles bajos y registran hiatos sedimentarios durante el Glacial Terminal.

El periodo de mayor humedad registrado por la comunidades vegetales en Zirahuén que va de los 7,160 a los 4,660 cal AP coincide con el registrado por Ortega-Guerrero *et al.* (en revisión) quienes lo señalan entre 7,160 y 3,060 cal AP dentro del cual reportan el nivel lacustre más alto registrado para este lago. Se sabe que los valores de insolación de verano en los trópicos y en los subtropicos del hemisferio norte alcanzaron un máximo (8% más altos que en el presente) hace 10,000 años (Ruddiman, 2001). Kutzbach (1985) sugiere que este incremento en la insolación debió haber provocado una circulación monzónica de verano muy intensa y esta circulación a su vez producido altos niveles lacustres en los lagos tropicales alrededor de los 10,000 años. La transición Pleistoceno-Holoceno en Pátzcuaro se encuentra marcada por una disminución en el nivel lacustre seguida por un rápido incremento en el nivel del agua (Bradbury, 2000). Bradbury (2000) y Metcalfe *et al.* (2007) reportan que el cambio más significativo en la asociación de diatomeas ocurre entre 12,800 y 10,400 cal AP; interpretado como un cambio en la estacionalidad de la precipitación de un régimen de invierno-verano a lo largo del cual se presenta una tendencia a calentamiento. Estos mismos autores sugieren que el lago de Pátzcuaro permaneció profundo, pero con diferentes características y que las condiciones de agua más somera y más secas se establecieron hasta el Holoceno medio. Este patrón parece coincidir con el registro de Zirahuén que marca también un nivel lacustre profundo hasta los 3,900 cal AP. Sin embargo, los registros de Zacapu y Cuitzeo indican condiciones relativamente secas de 10,000 a 8,000 cal AP y más secas a partir de los 5,000 cal AP; tal vez el aumento de temperatura incrementó la evaporación en estos lagos tan grandes y poco profundos. Es importante señalar, que existen registros de condiciones de sequía para el Holoceno temprano-medio hacia el este de Zirahuén; en el lago de Chalco donde se documentan bajos niveles lacustres a partir de los 10,000 cal AP y en el lago de Texcoco donde se registra la presencia de un hiato que persistió hasta los 6,000-5,000 cal AP. Por otro lado, a pesar de que

en la cuenca del Lerma hay una expansión de bosque durante la transición Pleistoceno-Holoceno y que parece ser que los niveles lacustres fueron altamente variables, se registran ser más someros entre 6,700 y 5,000 cal AP.

Posiblemente el alto nivel lacustre registrado para el Holoceno medio de Zirahuén no se deba a una señal climática sino a un evento geológico o bien la combinación de ambos. Ortega-Guerrero *et al.* (en revisión) reportan el emplazamiento de la estructura nombrada “Los Flujos de Lava de La Magueyera” (FLLM) la cual se traslapa con el hiato inferido en la secuencia (12,100-7,160 años cal AP) ya que está datada (mediante termoluminiscencia) con una edad de 6560 ± 950 años y se piensa que pudo haber modificado la morfología del lago y posiblemente los procesos lacustres. Ortega-Guerrero *et al.* (en revisión) creen que este evento volcánico afectó la morfología de la cuenca reduciendo el volumen del lago y probablemente el aporte de agua proveniente del río La Palma. De esta manera, las lavas contribuyeron a la profundización del lago después de un posible periodo de erosión.

Después de los 4,000 años cal AP, los registros de Pátzcuaro y Zirahuén coinciden en un incremento en la erosión. En ZIR03-I, la alta concentración iónica y la sedimentación clástica indican una alta inestabilidad ambiental con alternancia de condiciones secas y eventos de fuertes lluvias (Ortega-Guerrero *et al.*, en revisión). Es importante remarcar la fuerte disminución de *Alnus* a partir de los 3,800 cal AP; misma que registran Wats y Bradbury (1982) para Pátzcuaro a los 4,000 cal AP como indicativa de el comienzo de la agricultura alrededor de este lago. Esta disminución también es señalada por Xelhuantzi (1991) en Zacapu a los 8,200 cal AP y la relaciona con la transformación de la laguna de Zacapu en una ciénaga posiblemente por la tendencia climática hacia condiciones más secas. Este declive en *Alnus* observado tanto el Zirahuén como en Pátzcuaro y Zacapu posiblemente sea evidencia de una tendencia climática general en el centro de México hacia condiciones más secas a partir del Holoceno medio más que al inicio de la actividad humana como lo propone Watts y Bradbury en Pátzcuaro o bien, ser una combinación de ambas.

Los datos polínicos de la secuencia ZIR03-I señalan la presencia de *Zea mays* a los 3,560 cal AP un poco de tiempo después que la registrada (4,000 cal AP) por Watts y Bradbury (1982) en Pátzcuaro; esto indica que el establecimiento humano y el desarrollo de la agricultura se pudo haber desarrollado de manera contemporánea en los dos lagos; el cual es más evidente en Zirahuén para los últimos 1,500 años cal AP marcados por un incremento en la erosión lo cual coincide con las ideas de una erosión extensiva antes de la conquista española (O'Hara *et al.*, 1993). En el occidente de México, han sido documentadas diferentes evidencias de ocupación humana desde los 4,500 años cal AP (Oliveros, 1975). Aunque en Zirahuén los restos

arqueológicos son escasos, ha sido documentada una ocupación significativa a las orillas de Pátzcuaro (O'Hara *et al.*, 1993; Fisher *et al.*, 2003). Por otro lado, se observan que tanto Zirahuén como Pátzcuaro altos niveles de erosión para el Clásico tardío ca. AD 550-1100 asociado a una baja precipitación (Davies *et al.*, 2004; Metcalfe *et al.*, 2007; este estudio). A pesar de que no coincide con una densidad de habitantes en Zirahuén durante este tiempo, la presencia de *Zea mays* podría ser evidencia de actividades de agricultura en la cuenca. Además, la existencia de evidencias arqueológicas en sitios cercanos a Zirahuén puede revelar la presencia de centros culturales importantes durante el Clásico (Arnauld *et al.*, 1993; Carot, 1994).

Finalmente, el incremento de los procesos de erosión después de los 3,020 años cal AP (1070 AD) correlacionan con el pico en el desarrollo de los Tarascos o Purépechas. Davies *et al.* (2004) documentan una zona de drenaje con menos erosión para el intervalo de ca. 1550-1750 cuando pocos establecimientos con baja población ocurrieron (Martínez, 1974; Carrillo-Cazares, 1996). Sin embargo, en el núcleo ZIR03-I el periodo de alta erosión se extiende hasta después del depósito de la tefra del Jorullo (1759- 1764).

Conclusiones

El conjunto de datos paleoecológicos obtenidos para el lago de Zirahuén sugieren que durante el glacial tardío (18,000 a 15,000 cal AP) las condiciones climáticas eran más frías y menos húmedas que las del presente; el lago presentaba un tirante de agua (ca. -18 m) menor al actual y una amplia zona litoral donde se establecieron las comunidades de *Isoetes* tipo 1. Para el glacial terminal (15,000 a 12,000 cal AP) hay un incremento breve en la humedad, previo al hiato en la secuencia sedimentaria (12,100-7,160 cal AP), el cual no permite tener un registro de las condiciones durante la transición Pleistoceno-Holoceno. El registro del Holoceno muestra ambientes dinámicos con cambios en la humedad y en la vegetación destacando hacia el Holoceno tardío evidencias de agricultura y una tendencia hacia condiciones más secas.

El análisis palinológico de la secuencia sedimentaria ZIR03-I mostró cambios en cuanto a la composición y abundancia desde un bosque de pino y un lago dominado por comunidades de *Isoetes* tipo 1 durante el glacial tardío, hasta constituir un bosque de pino-encino, *Alnus* y elementos mesófitos. La vegetación regional del Holoceno temprano-medio estuvo representada por bosques de pino-encino, *Alnus* y por porcentajes más altos de elementos de bosque mesófilo de montaña, mientras que la vegetación acuática marca una reducción gradual de las microesporas de *Isoetes* tipo 1. Finalmente para el Holoceno tardío la vegetación regional registra un aumento en la diversidad y en la abundancia de herbáceas y pteridofitas ligada a la disminución en las comunidades de *Alnus*.

De acuerdo con registro de diatomeas presentado por Ortega-Guerrero et al. (en revisión) fue posible inferir cinco fluctuaciones importantes en el nivel lacustre del lago de Zirahuén durante los últimos 17,000 años. De 17,000-14,330 cal AP la abundancia de taxa litorales epifíticos dominados por *Cocconeis placentula* indica un lago somero, dulce y alcalino. De 14,330 a 12,560 el incremento de los porcentajes de *Ulnaria ulna*, *Fragilaria construens* y *Cyclotella ocellata* señala un incremento en la profundidad. De 7,160 a 3,900 cal AP la dominancia de *Aulacoseira ambigua* var. *robusta* indica el desarrollo más profundo y más eutrófico (que durante el Pleistoceno tardío) el cual a partir de 3,900 cal AP comienza una reducción por la disminución de *A. ambigua* var. *robusta* y el incremento de *Diploneis elliptica*. Finalmente, a partir de los 1,400 cal AP al presente, la presencia de *Cyclotella ocellata* y de *Hantzschia amphioxys* señalan un lago aún más somero y con una tendencia a eutroficación.

El periodo más húmedo para los últimos 17,000 años en el registro ZIR03-I del lago de Zirahuén ocurre entre 7,160 y 4,600 cal AP y coincide con el periodo señalado por Ortega-

Guerrero et al. (en revisión) (7,160 a 3,900 cal AP) como el intervalo en el cual el lago desarrolló su etapa más profunda.

Los altos valores de COT y la disminución en la relación C/N registrados para el intervalo de 7,160 a 3,700 cal AP pueden estar relacionados con la expansión de la comunidad de *Alnus* alrededor del lago documentada para este periodo. Esta comunidad arbórea pudo haber incrementado la productividad de las poblaciones de diatomeas dentro del lago como resultado de la fijación de nitrógeno llevada a cabo por ésta en los suelos que rodean el lago.

A partir de 3,800 cal AP se registra una alta inestabilidad ambiental marcada principalmente por fluctuaciones en la erosión alrededor de la cuenca y en la vegetación; las comunidades de *Alnus* disminuyen drásticamente y existe un incremento en la abundancia de polen de herbáceas. Esta disminución en *Alnus* está también documentada en los registros de los lagos de Pátzcuaro (4,000 cal AP) y Zacapu (8,200 cal AP) que podría sugerir el establecimiento de una tendencia climática hacia condiciones más secas a partir del Holoceno medio en los lagos del centro occidental de México.

Los últimos 1,500 años cal AP en el lago de Zirahuén se encuentran representados por un incremento en la erosión marcada por un incremento gradual en los valores de la susceptibilidad magnética y el establecimiento del cladóceros *Bosminia longirostris* dentro del lago el cual marca el regreso al lago de condiciones eutróficas. Este incremento en la erosión está ligado al impacto humano ya que se registra la presencia de *Zea mays* en la cuenca de Zirahuén a los 3,560 cal AP.

El registro de *Zea mays* en Zirahuén (3,560 cal AP) es documentado después del reportado por Watts y Bradbury en 1982 (4,000 cal AP). Sin embargo, la diferencia de edad es muy corta por lo cual existe la posibilidad de que ambas cuencas hayan sido ocupadas por el hombre de una manera contemporánea. De cualquier manera, la presencia de polen de maíz a los 3,560 cal AP en el lago de Zirahuén, señala que la agricultura dentro de la cuenca se ha llevado a cabo desde el Preclásico (ca. 1000-450 BC).

Literatura Ciada

- Alvarado, V. R. (2003). Dinámica estacional y circadiana del fitoplancton en el lago de Zirahuén, Michoacán México. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. pp. 124.
- Andersen, B. G., Borns, H. W. 1994. The Ice Age. An introduction to Quaternary History and Research with Emphasis on North America and North Europe During the Last 2.5 Million Years. Scandinavian University Press pp.208.
- Arnauld C, Carot P, Fauvet-Berthelot MF (1993) Arqueología de Las Lomas en la cuenca lacustre de Zacapu, Michoacán, México. CEMCA, Cuadernos de Estudios Michoacanos 5, México
- Arnauld C., Metcalfe, S.E. y Petrequin, P. 1997. Holocene climatic change in the Zacapu lake basin, Michoacán: synthesis of results. *Quaternary International*. 43-44: 173-179.
- Bernal-Brooks F.W. 1998. The lakes of Michoacán (Mexico): a brief history and alternative point of view. *Freshwater Forum* 10: 20-34.
- Bernal-Brooks, F.W. y MaCrimmon HR. 2000a. Lake Zirahuén (Mexico): an assessment of the morphometry change based on evidence of water level fluctuations and sediment inputs In: Munawar M., Lawrence S.G., Munwar J. R. and Malley D. (eds). *Aquatic Ecosystems of Mexico*. Ecovision World Monograph Series, Backhuys, Leiden, pp. 61-70.
- Bernal-Brooks, F.W. y MaCrimmon HR. 2000b. Lake Zirahuén (Mexico): a pristine natural reservoir visually insensitive to expected cultural eutrophication. In: Munawar M., Lawrence S.G., Munwar J. R. and Malley D. (eds). *Aquatic Ecosystems of Mexico*. Ecovision World Monograph Series, Backhuys, Leiden, pp. 77-88.
- Birks, H. J. (1980). Techniques in pollen analysis. *Quaternary Palaeoecology*. Edward Arnold. pp. 165-175.
- Birks, . J. B. and Birks, 1980. *Quaternary palaeoecology*. Arnold. London. 289 pp.
- Birks, H. J. (1986). Pollen analysis and pollen diagrams. En: *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology*. Editado por Berglund, Björn E. John Wiley & Sons. Reino Unido. pp.657-685. [no utilizado en texto, pero fue muy importante para comprender conceptos]
- Bonilla-Barbosa, J. R., Novelo, A. 1995. *Manual de identificación de plantas acuáticas del Parque Nacional Lagunas de Zempoala, México*. Universidad Nacional Autónoma de México, p.71.
- Bradbury, J. P. 1997. Sources of glacial moisture in Mesoamerica. *Quaternary International*. 43/44: 97-110.

- Bradbury, J.P., 2000. Limnologic history of Lago de Pátzcuaro, Michoacán, México for the past 48,000 years: impacts of climate and man. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 163: 65-95.
- Caballero, M., Lozano-García, S., Vázquez-Selem, L., y Ortega-Guerrero, B. (en revisión). Evidencias de Cambio Climático y Ambiental en Registros Glaciales y Cuencas de Altura del Centro de México Durante el Último Máximo Glacial.
- Carot, P 1994. Loma Alta: antigua isla funeraria en la ciénaga de Zacapu, Michoacán. In: Williams E, Novella R (eds) Arqueología del Occidente de México: nuevas aportaciones. El Colegio de Michoacán, Zamora, pp 93-122.
- Carrillo, C. A. 1996. Partidos y padrones del obispado de Michoacán, 1680-1685, México. El Colegio de Michoacán, Gobierno del Estado de Michoacán.
- Chacón T.A. y Múzquiz E.L. 1991. El Lago de Zirahuén, Michoacán, México. Reconocimiento Ambiental de una cuenca michoacana. Universidad Michoacana de san Nicolás de Hidalgo. Morelia, Mich. 30pp.
- Chacón, T. A. y Rosas-Monge C. 1998. Water quality characteristics of a high altitude oligotrophic Mexican lake. *Aquatic Ecosystem Health and Management Society* 1: 237-243.
- Crisman, T. L. 1978. Algal remains in Minnesota lake types: a comparison of modern and Late-Glacial distributions. *Verh. Internat. Verein. Theor. angew. Limnol.* 20:445-451.
- Davies, S. J., Metcalfe, S. E., Caballero, M., E., Juggins, S. 2002 Developing diatom based transfer functions for central Mexican lakes. *Hydrobiología* 467, 199-213.
- Davies, S. J., Metcalfe, S. E., MacKenzie, A. B., Newton, A., Endfield, G. H. and Farmer, J. G. 2004. Environmental changes in the Zirahuén Basin, Michoacán, during the last 1000 years. *Journal of Paleolimnology* 31, 77-98. Fisher C., Pollard H., Israde I., Garduño V., y Banerjee S., 2003. A reexamination of human-induced environmental change within the Lake Pátzcuaro Basin, Michoacán, Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA.* 100-8 4957- 4962.
- De Bernadi, R., Guissani, G., Manca, M., 1987. Cladocera: predators and prey. *Hydrobiología* 145, 225-243.
- De Buen, F. 1943. Los Lagos Michoacanos. I. Caracteres Generales. El Lago de Zirahuén. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.* 4: 211-232.
- Demant, A., R., Mauvois y L. Silva. 1976. El Eje Neovolcánico Transmexicano. Excursión No. 4. III Congreso Latinoamericano de Geología. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. 26 pp.
- Egler, W. A. 1948. Plant communities in the vicinity of the volcano Parícutin, Mexico, after two and a half years of eruption. *Ecology* 29, 415-437.

- Endfield G. H. y O'Hara S. L. 1999. Degradation, drought and dissent: an environmental history of colonial Michoacán West Central Mexico. *Ann. Assoc. Am. Geogr.* 89: 402-419.
- Engstrom, D. R., Fritz, S. C., Almendinger, J. E., Juggins, S. 2000. Chemical and Biological trends during lake evolution in recently deglaciated terrain. *Nature* 408, 6-161.
- Faegri, K. e Iversen, J. 1989. Textbook of pollen Analysis. John Wiley & Sons Ltd. Great Britain, 328pp.
- Fisher CT., Pollard HP, Israde I, Garduño V, Banerjee SK (2003). A re-examination of human-induced environmental change within the Lake Patzcuaro Basin. Michoacán, Mexico. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 100: 4957-4962.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de kopen: Para adaptarlo a las condiciones de la república Mexicana. UNAM. México. pp246.
- Goldman, C. R., 1961. The contribution of alder trees (*Alnus tenuifolia*) to the primary productivity of Castle lake, California. *Ecology* 42, 8-282.
- Gotelli, N. J., Ellison, A. M. 2004. A primer of Ecological Statistics. Sinauer Associates, Inc. Publishers, Sunderland, Massachusetts U.S.A. pp510.
- Greenwood, T. L., Green, J. D., Hicks, B. J., Chapman, A. 1999. Seasonal abundance of small cladocerans in lake Mangakaware, Waikato, New Zealand, N. Z. J. Mar. Freswat. Res. 33 399-415.
- Grimm, E. C. (1987), CONISS: A FORTRAN program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares. *Computer and Geosciences* 13, 13-35.
- Grimm, E. C. (1992), TILIA 2 software. Springfield: Illinois State Museum. Haslet , S.K. 2002. *Quaternary Enviromental Micropaelaeontology*. Arnold, London, p. 241-258.
- Grimm, E. C., Jacobson, G. L., Watts, W. A., Hansen, B. C. S., Maasch, K. A. 1993. A 50, 000-years record of climate oscillations from Florida and its temporal correlation with the Heinrich events. *Science*, 261, 198-200.
- Hardoon, R. D., Sandor, S., Shawe-Taylor, J. 2003. Canonical Correlation Analysis: an overview with application to learning methods. Technical report CSD-TR-03-02. Department of Computer Science. Royal Holloway, University of London.
- Head, R. M., Jones, R. I., Bailey-Watts, A. E. 1999. An assessment of the influence of recruitment from the sediment on the development of planktonic populations of cyanobacteria in a temperate mesotrophic lake. *Freshw. Biol.* 41, 759-769.
- Higgins RW, MoKC, Yao Y (1998). Internal Variability of the US summer precipitation regime with emphasis on the southern monsoon. *Journal Climate*. 11: 2582-2606.
- Hülsmann, S. 2001. Reproductive potential of *Daphnia galeata* in relation to food conditions: implications of a changing size-structure of the population. *Hidrobiología* 442, 241-252.

- Hutchinson, G. E. 1967. A treatise on limnology. Volume II. Introduction to lake biology and the limnoplankton. Wiley, New York, 1115 pp.
- Israde, A.I. 1999. Los lagos volcánicos y tectónicos de Michoacán. Carta Geológica de Michoacán. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Mich. Pp. 46-74
- Israde Alcántara, I., Garduño-Monroy, V. H., y Ortega Murillo, R. 2002. Paleoambiente lacustre del Cuaternario tardío en el centro del lago Cuitzeo. *Hidrobiológica*, 12:61- 78.
- Istvanovics, V., Petterson, K., Rodrigo, M. A., Person, D., Padisak, J., Colom, W. 1993. *Gloeotrichia echinulata*, a colonial cyanobacterium with a unique phosphorus uptake and life strategy. *J. Plankton Res.* 15, 531-552.
- Jones, L. 1987. Encyclopaedia of ferns: An introduction to ferns, their Structure, Biology, Economic Importance, Cultivation and Propagation. Lothian Pub. Company Pty LDT., Melbourne 433p.
- Kilham, P., Kilham, S. S., Hecky, R. E. 1986. Hypothesized resource relationships among African planktonic diatoms. *Limnol Oceanogr* 31, 1169-1181.
- Karlsson, E. I. 2003. Studies of the Life Cycle of Akinete Forming Cyanobacteria. Acta Universitatis Upsaliensis, UPPSALA. Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 858.
- Krammer K. and Lange-Bertalot H. 1986. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bacillariophyceae 1 Gustav. Fischer Verlag Stuttgart. New York P.876.
- Krammer K. and Lange-Bertalot H. 1988 Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bacillariophyceae. 2. Teil: Epithemiaceae, Bacillariaceae, Surirellaceae, vol. 2/2. Gustav Fischer, Stuttgart, 596 pp.
- Krammer K. and Lange-Bertalot H. 1991a Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bacillariophyceae. 3. Teil: Centrales; Fragilariaceae, Eunotiaceae, vol. 2/3, Gustav Fischer, Stuttgart, 576 pp.
- Krammer K. and Lange-Bertalot H. 1991b Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bacillariophyceae. 4. Teil: Achnantheaceae, vol. 2/4, Gustav Fischer, Stuttgart, 437 pp.
- Komárek, J., Jankovská, V. 2001. Review of Green Algal Genus *Pediastrum*: implications for Pollen-Analytical Research. J. Cramer. Stuttgart.
- Kutzbach, J. E. 1985. Modeling of paleoclimates. *Adv. Geophys*, 28A:159-196.
- Lampert, W. 1978. Field study on the dependence of the fecundity of *Daphnia spec.* on food concentration. *Oecologia* 36, 363-369.

- Lozano-García, M.S., Ortega-Guerrero, B., 1997. Late Quaternary environmental changes of the central part of the Basin of México. Correlation between Texcoco and Chalco basins. *Review of Palaeobotany and Palynology* 99:77-93.
- Lozano-García, M.S., Vázquez-Castro, G., Israde-Alcántara, I. (2010). Registro palinológico de la perturbación humana y natural de los últimos 3200 años en el lago de Zirahuén, centro-occidente de México en Ayala Torres L y Cárdenas Estrada, B (eds) Espejo de los dioses: estudios sobre ambiente y desarrollo en la cuenca del lago de Zirahuén. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo e Instituto de Investigaciones Económicas y Empresariales, pp. 87-112.
- Macluf, C. C., Morbelli, M. A., Giudice, G. E. 2003. Morphology and ultrastructure of megaspores and microspores of *Isoetes savatieri* Franchet (Lycophyta). *Review Paleobotany Palynology* 126, 197-209.
- Martínez LJJ (1974) Analisis estadístico de la provincia de Michoacán en 1822. Colección Estudios Michoacanos IV, FIMAX, Morelia, Mexico
- Metcalfe, S.E. 1992. Changing environments of the Zacapu Basin central Mexico: a diatom-based history spanning the last 30,000 years. Research paper 38, School of Geography, Oxford 38pp.
- Metcalfe, S.E. 1997. Paleolimnological records of climate change in Mexico-frustrating past, promising future? *Quaternary International* 43/44, pp. 111-116.
- Metcalfe SE, 1995. Holocene environmental change in the Zacapu Basin, Mexico: a diatom-based record. *Holocene* 5: 196-208.
- Metcalfe, S.E. y Harrison, S.P. 1984. Cambio Ambiental del Cuaternario tardío en depósitos lacustres en la Cuenca Zacapu, Michoacán, reconstrucción preliminar. *Boletín del Instituto de geografía* Num 14: 127-151.
- Metcalfe, S. E., O' Hara, S. L., Caballero, M., y Davies, S. J. 2000. Records of Late Pleistocene - Holocene climatic change in Mexico - a review. *Quaternary Science Reviews* 19:699 - 721.
- Metcalfe, S.E., Endfield, G. H., Prieto, M. del R., Davies, S.J., O'Hara, S. L., 2002. The potential of archival resources for reconstructing climate and climate related processes in Latin America. *PAGES News* 10, 11-14.
- Metcalfe, S.E., Davies, S.J., Braisby, Melaine, J.L., Newton, J.A., Terrett, L N., O'Hara, S.L. 2006. Long and short-term change in the Patzcuaro Basin central Mexico. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. (20): 1-24.
- Metcalfe S. y Davies S. 2007. Deciphering recent climate change in central Mexican lake records. *Climatic Change* 83: 169-186.
- Mickel, J.T., y Smith, A.R. 2004. The Pteridophytes of Mexico. *The New York Bot. Gard.* 88: 1-1054.
- Mingram, J., Negendank, J. F. W., Brauer, A., Berger, D., Hendrich, A., Köhle, M., Usinger, H. 2007. Long cores from small lakes-recovering up to 100 m-long lake

sediments sequences with a high precision rod-operated piston corer (Usinger-corer): *Journal of Paleolimnology*, 37(4), 517-528.

- Moran, C., R., y Riba, R. 1995. In: Davidse, G., M. Suosa, S., S. Knapp (eds) *Flora Mesoamericana* vol. 1 Psilotaceae a Salviniaceae. Universidad Nacional Autónoma de México. Missouri Botanical Garden and The Natural History Museum (London) pp. 42-43.
- Mosiño Aleman PA, García E. 1974. The climate of Mexico. In: Bryson RAH, Hare FK (eds,) *Climates of North America* 2.
- Newton, A.J., Metcalfe, S.E., Davies, S.J., Cook, G., Baker, P., Telford, R.J. 2005. Late Quaternary volcanic records from lakes of Michoacan, central Mexico. *Quaternary Science Reviews* 24, 91-104.
- Nielsen, H., Sorensen, I. 1992. Taxonomy and stratigraphy of late-glacial *Pediastrum* taxa from Lysmosen, Demark- a preliminary study. *Review of Paleobotany and Palynology* 74, 55-75.
- O'Hara S. I, Street-Perrott FA, Burt T. P. 1993. Accelerated soil erosion around a Mexican highland lake caused by Pre-Hispanic agriculture. *Nature* 362: 48-51
- Ohmura, A., Kasser, P., y Funk, M. 1992. Climate at the equilibrium line of glaciers: *Journal of Glaciology*, 38, 397-411.
- Oliveros J. A. 1975. Arqueología del estado de Michoacán. In: Los pueblos y señoríos teocráticos. Mexico: panorama histórico y cultural, vol. VII, Instituto Nacional de Antropología e Historia, México, pp 207-214
- Ortega B., Caballero M., Lozano S., Israde I. y Vilaclara G., 2002. 52,000 years of environmental history in Zacapu Basin, Michoacán, Mexico: The magnetic record. *Earth and planetary Science Letter*. 202 663-675.
- Ortega-Guerrero, B., Vázquez, G., Caballero, M., Israde, I., Lozano, S., Schaaf, P., Torres E. (en revisión). Late Pleistocene-Holocene record of environmental changes in lake Zirahuen, central Mexico.
- Pentecost, A. 1984. *Introduction to Freshwater Algae*. The Richmond Publishing Co Ltd. 247pp.
- Pérez-Calix, E. 1996. Flora y Vegetación de la cuenca del Lago de Zirahuén, Michoacán, México. Fascículo complementario XIII. Flora del Bajío y de regiones adyacentes. Instituto de Ecología, A. C. Centro Regional del Bajío, Pátzcuaro, Mich. 73 pp.
- Petrequin, P. 1994. 8,000 años de la cuenca de Zacapu: evolución de los paisajes y primeros desmontes. *Cuadernos de Estudios Michoacanos*. 6: 81-93.

- Prentice, C. 1988. 2 Records of vegetation in time and space: the principles of pollen analysis. In Huntley, B. & Webb, T. III (eds.), *Vegetation History*, Kluwer Academic Publishers. Netherlands, 17-41 pp.
- Rzedowski, J., y Rzedowski, G. C. 1993. Datos sobre la dinámica de la flora fanerogámica del Valle de México, con énfasis en especies nativas raras, en peligro de extinción y aparentemente extintas. *Acta Botánica Mexicana*, 25: 81-108.
- Rzedowski, J. y McVaugh, R. 1996. La vegetación de Nueva Galicia. *Contr. Univ. Michigan Herb.* 9: 1-123.
- Reimer, P. J., Baillie, M. G. L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J. W., Bertrand, C. J. H., Blackwell, P. G., Buck, C. E., Burr, G. S., Cutler, K. B., Damon, P. E., Edwards, R. L., Fairbanks, R. G., Friedrich, M., Guilderson, T. P., Hogg, A. G., Hughen, K. A., Kromer, B., McCormac, F. G., Manning, S. W., Ramsey, C. B., Reimer, R. W., Remmele, S., Southon, J. R., Stuiver, M., Talamo, S., Taylor, F. W., Plicht, J., Weyhenmeyer, C. E. 2004. IntCal04 Terrestrial radiocarbon age calibration 26-0 ka BP: *Radiocarbon* 46, 1029-1058.
- Rosas, M.C. 1997. La cuenca del lago de Zirahuén: los avances del deterioro. Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Biología Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mich. 187 pp.
- Ruddiman, W. F. 2002. *EARTH'S CLIMATE; Past and Future*. University of Virginia Lamont-Doherty Earth Observatory. W. H. Freeman and Company New York, pp. 465.
- Rumrich U., Lange-Bertalot H., Rumrich M., 2000. Diatomeen der Anden. Von Venezuela bis Patagonien/Tierra de Fuego. *Iconografía diatomológica*. Vol.9. 673 p. Koeltz Scientific Books.
- Sánchez, M. N., y Huguet, L. 1959. Las coníferas mexicanas. *Unasylva* 3, 24-35.
- Sarmaja-Korjonen, K., Seppänen, Ole, B. 2006. *Pediastrum* algae from the classic late glacial Bolling So site, Denmark: Response of aquatic biota to climate change. *Review of Paleobotany and Palynology* 138, 95-107.
- Sheng Hu, F., Finney, B. P., Brubaker, B. L. 2001. Effects of Holocene *Alnus* expansion on aquatic productivity, nitrogen cycling, and soil development in southwestern Alaska. *Ecosystem* 4, 358-368.
- Smith, A. R. 1981. Flora de Chiapas. *The California Academy of Science*, 2: 1-370.
- Stuiver, M., Reimer, P. 1993. Extended ^{14}C data base and revised Calib 3.0 ^{14}C calibration program: *Radiocarbon*, 35, 215-230.
- Stuiver, M., Reimer, P., Reimer, R. W. 2005. CALIB 5.0 program and documentation (en línea), versión Calib 5.0.2; United Kingdom, <http://calib.qub.ac.uk/calib/calib.html>, consulta: abril 2005.
- Tavera, R., y Martínez-Almeida, V. 2005. Atelomixis as a posible driving force in the phytoplankton composition of Zirahuén, a warm-monomictic tropical lake. *Hidrobiología* 533: 199-208.

- Ter BRAAK, C.J.F. (1986). 'Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis'. *Ecology* 67;1167-1179.
- Tymowski, R. G., Duthie, H. C. 2000. Life strategy and phosphorus relations of the cyanobacterium *Gloeotrichia echinulata* in an oligotrophic Precambrian Shiled lake. *Arch. Hydrobiol.* 148, 321-332.
- Watts, W. A. y 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, 56-20.
- Vázquez G., en preparación, ESTUDIO PALEOCLIMÁTICO Y PALEOAMBIENTAL DE LOS SEDIMENTOS DEL LAGO ZIRAHUÉN, MICHOACÁN, UTILIZANDO TÉCNICAS DE MAGNETISMO DE ROCAS Y GEOQUÍMICA AMBIENTAL. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, México D. F.
- Vázquez, G., Ortega-Guerrero, B., Davies, S. H., Aston, J. B. (sometido) Registro sedimentario de los últimos ca. 17,000 años del lago de Zirahuén, Michoacán, México.
- Valdez-Avila, R., Mendoza-Ruiz, A., Pérez-García, B. 2009. Nota científica. *Isöetes ¿Una planta?* ContactoS 73, 57-62.
- Van Geel B. 2001 Non-Pollen palynomorphs In: I. P. Smol, H. J. B. Birks & W. M. Last (eds.), 2001. Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Volume 3: Terrestrial, Algal and Siliceous Indicators. Kluwer Academic Publishers, Dordrech, The Netherlands.
- Velázquez A., Toledo, V. M. y Luna I. 2000. Mexican Temperate Vegetation.
- Velázquez D.R., I.A. Israde y G.M.S. Lozano. 2000. Registro palinológico en el lago de Cuitzeo. Implicaciones ambientales en los últimos 35, 000 años AP. *Geos* 20(3): 167.
- Velázquez-Duran, R. 2003. Evolución paleoambiental del lago de Cuitzeo durante el Pleistoceno tardío: historia de la vegetación e implicaciones paleoclimáticas. Tesis Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 210 pp.
- Whitlock, C., and Larsen, C. 2001. Charcoal as a fire proxy. In: J.P. Smol, H. J. B. Birks and W. M. Last (eds.) Tracking Environmental Change using Lake Sediments. Volume 3: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators, Kluwer Academic, Publishers, Dordrech, The Netherlands pp..76-92.
- Xelhuanzi Lopez, M.S. 1991. Estudio palinológico y Reconstrucción paleoambiental del ex.lago de Zacapu, Michoacán. Tesis Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 168pp.
- Xelhuanzi Lopez, M.S. 1994. Estudio palinológico de cuatro sitios ubicados en la Cuenca de Zacapu: fondo de ciénega, contacto Lomas-ciénega, pantano interno y Loma Alta. Cuadernos de Estudios Michoacanos. 6: 81-93.

ANEXO I

Composición actual del bosque de <i>Quercus</i> de la cuenca del lago de Zirahuén							
Estrato arbóreo superior	Estrato arbóreo inferior	Estrato arbustivo	Estrato herbáceo	Epífitas	Trepadoras leñosas y herbáceas altas	Hemiparásitas	Hongos macromicetos
<i>Alnus acumiunata</i> ssp. <i>arguta</i>	<i>Arbustus xalapensis</i>	<i>Acacia angustissima</i>	<i>Adiantum andicola</i>	<i>Cymboglossum cervantesii</i>	<i>Celastrus pringlei</i>	<i>Cladocolea microphylla</i>	<i>Amanita</i>
<i>Oreopanax xalapensis</i>	<i>Citharexylum affine</i>	<i>Archibaccharis sescenticeps</i>	<i>Arracacia atropurpurea</i>	<i>Encyclia</i> aff. <i>rhomblilabia</i>	<i>Clematis dioica</i>	<i>Phoradendrom velutinum</i>	<i>Boletus</i>
<i>Pinus pseudostrobus</i>	<i>Clethra hartwegii</i>	<i>Arctostaphylos rupestris</i>	<i>Asplenium monanthes</i>	<i>Epidendrum anisatum</i>	<i>Didymaea floribunda</i>	<i>Conopholis alpina</i>	<i>Cantharellus</i>
<i>Pinus serotina</i> ssp. <i>capuli</i>	<i>Clethra Mexicana</i>	<i>Berberis moranensis</i>	<i>Carex polystachya</i>	<i>Fuchsia fulgens</i>	<i>Smilax moranensis</i>		<i>Clitocybe</i>
<i>Quercus castanea</i>	<i>Cornus disciflora</i>	<i>Calea integrifolia</i>	<i>Cheilanthes bonariensis</i>	<i>Oncidium cavendishianum</i>	<i>Smilax pringlei</i>		<i>Cortinarius</i>
<i>Quercus crassipes</i>	<i>Cornus excelsa</i>	<i>Ceanothus caeruleus</i>	<i>Cologania broussonetii</i>	<i>Peperomia quadrifolia</i>	<i>Matelea chrysantha</i>		<i>Geastrum</i>
<i>Quercus dysophylla</i>	<i>Crataegus pubescens</i>	<i>Cestrum nitidum</i>	<i>Commelina tuberosa</i>	<i>Physosiphon loddigesii</i>	<i>Rhus radicans</i>		<i>Helvella</i>
<i>Quercus laurina</i>	<i>Eupatorium mairetianum</i>	<i>Cestrum roseum</i>	<i>Corallorrhiza involuta</i>	<i>Pleurothallis hieroglyphica</i>	<i>Rubus liebmannii</i>		<i>Hydnum</i>
<i>Quercus obtusata</i>	<i>Garrya laurifolia</i>	<i>Cestrum thysoideum</i>	<i>Cranichis mexicana</i>	<i>Pleurothallis sanguinolenta</i>	<i>Solanum appendiculatum</i>		
<i>Quercus rugosa</i>	<i>Meliosma dentata</i>	<i>Desmodium densiflorum</i>	<i>Dahlia coccinea</i>	<i>Polypodium cupreolepis</i>	<i>Valeriana clematitidis</i>		
<i>Tilia mexicana</i>	<i>Styrax argenteus</i>	<i>Eupatorium areolare</i>	<i>Diastatea tenera</i>	<i>Polypodium madrense</i>			
	<i>Symplocos citrea</i>	<i>Fuchsia microphylla</i>	<i>Echeveria filgens</i>	<i>Tillandsia cossonii</i>			
		<i>Furcraea bedinghausii</i>	<i>Echeviera mucronata</i>	<i>Tillandsia prodigiosa</i>			
		<i>Lagascea helianthifolia</i>	<i>Elaphoglossum pilosum</i>				

		<i>Lippia umbellata</i>	<i>Eryngium alternatum</i>				
		<i>Manfreda brachystachya</i>	<i>Eupatorium</i> spp.				
		<i>Monnina ciliolata</i>	<i>Euphorbia</i> spp.				
		<i>Montanoa frutescens</i>	<i>Festuca breviglumis</i>				
		<i>Prionosciadium thapsoides</i>	<i>Galium uncinulatum</i>				
		<i>Rapanea juergensenii</i>	<i>Gnaphalium</i> spp.				
		<i>Rhamnus hintonii</i>	<i>Begonia balsmiana</i>				
		<i>Salvia</i> spp.	<i>Bidens ostruthioides</i>				
		<i>Senecio</i> spp.	<i>Brickellia scoparia</i>				
		<i>Symphoricarpos microphyllus</i>	<i>Govenia purpusii</i>				
		<i>Verbesina</i> sp.	<i>Govenia superba</i>				
		<i>Vernonia alamanii</i>	<i>Habenaria jaliscana</i>				
		<i>Viburnum elatum</i>	<i>Liparis fantastica</i>				
		<i>Viburnum loeseneri</i>	<i>Lotus</i> sp.				
			<i>Micropleura renifolia</i>				
			<i>Peperomia campylotropa</i>				
			<i>Peperomia hispidula</i>				
			<i>Phaseolus pauciflorus</i>				
			<i>Phyasalis volubilis</i>				
			<i>Poa annua</i>				
			<i>Selaginella pallescens</i>				
			<i>Selaginella porphyrospora</i>				
			<i>Spiranthes minutiflora</i>				
			<i>Triphora trianthophora</i>				
			<i>Valeriana</i> spp.				
			<i>Villadia batesii</i>				

ANEXO II

Composición actual del bosque de <i>Pinus</i> de la cuenca del lago de Zirahuén; algunos ejemplos de las principales especies presentes en este tipo de vegetación					
Estrato arbóreo	Estrato arbustivo	Estrato herbáceo	Epífitas	Hierbas anuales y perennes	Hongos
<i>Pinus pseudostrabus</i>	<i>Baccharis heterophylla</i>	<i>Aegopogon cenchroides</i>		<i>Astragalus guatemalensis</i>	<i>Aleuria</i>
<i>Quercus laurina</i>	<i>Eupatorium glabratum</i>	<i>Arracacia atropurpurea</i>	<i>Tillandsia prodigiosa</i>	<i>Castilleja arvensis</i>	<i>Armillaria</i>
<i>Quercus rugosa</i>	<i>Eupatorium mairitianum</i>	<i>Bromus carinatus</i>		<i>Conyza coronopifolia</i>	<i>Clytocybe</i>
<i>Arbustus xalapensis</i>	<i>Rumfordia floribunda</i>	<i>Cirsium ehrenbergii</i>		<i>Delea obovatifolia</i>	<i>Collibya</i>
<i>Pinus leiophylla</i>	<i>Senecio spp.</i>	<i>Crusea coccinea</i>		<i>Desmodium densiflorum</i>	<i>Craterellus</i>
<i>Pinus michoacana</i>	<i>Solanum cervantesii</i>	<i>Daucus montanus</i>		<i>Gnaphalium sp.</i>	<i>Hydnum</i>
	<i>Solanum lanceolatum</i>	<i>Dryopteris cinnamomea</i>		<i>Jaegeria hirta</i>	<i>Hygrophoropsis</i>
	<i>Stevia subpubescens</i>	<i>Eryngium mexiae</i>		<i>Linum orizabae</i>	<i>Hypomyces</i>
	<i>Symphoricarpos microphyllus</i>	<i>Festuca amplissima</i>		<i>Lobelia fenestralis</i>	
		<i>Helianthemum glomeratum</i>		<i>Lupinus sp.</i>	
		<i>Hieracium abscisum</i>		<i>Oxalis hernandesii</i>	
		<i>Lithospermum distichum</i>		<i>Piqueria trinervia</i>	
		<i>Muhlenbergia macroura</i>		<i>Pteridium aquilinum</i>	
		<i>Panicum albo-maculatum</i>		<i>Rubus liebmannii</i>	
		<i>Piptochaetium virescens</i>			
		<i>Piqueria pilosa</i>			
		<i>Salvia mexicana</i>			
		<i>Sisyrinchium scabrum</i>			
		<i>Trisetum deyeuxioides</i>			
		<i>Trisetum virletii</i>			

ANEXO III

Composición actual del bosque de <i>Abies</i> de la cuenca del lago de Zirahuén. Se muestran algunos ejemplos de los principales taxa que lo constituyen.							
Estrato arbóreo superior	Estrato arbóreo inferior	Estrato arbustivo	Estrato herbáceo	Fanerógamas o rastreras	Especies de hábitos rupícolas	Matorrales secundario	Hongos
<i>Abies religiosa</i>	<i>Alnus jorullensis</i>	<i>Ceanothus caeruleus</i>	<i>Acaena elongata</i>	<i>Alchemilla procumbens</i>	<i>Arctostaphylos discolor</i>	<i>Baccharis conferta</i>	<i>Amanita</i>
<i>Pinus montezumae</i>	<i>Arbustus xalapensis</i>	<i>Cestrum anagyris</i>	<i>Adiantum andicola</i>	<i>Arenaria lanuginosa</i>	<i>Arbustus occidentalis</i> var. <i>villosa</i>	<i>Baccharis heterophylla</i>	<i>Boletus</i>
<i>Pinus pseudostrubus</i>	<i>Buddleia cordata</i>	<i>Cestrum nitidum</i>	<i>Archibaccharis spp.</i>	<i>Arenaria reptans</i>	<i>Castilleja arbensis</i>	<i>Lupinus sp.</i>	<i>Boletellus</i>
<i>Quercus laurina</i>	<i>Clethra mexicana</i>	<i>Cirsium subcoriaceum</i>	<i>Arracacia atropurpurea</i>	<i>Cerastium glomeratum</i>	<i>Echeveria mucronata</i>	<i>Rhodosciadium toluicense</i>	<i>Cortinarius</i>
<i>Quercus rugosa</i>	<i>Garrya laurifolia</i>	<i>Eupatorium mairitianum</i>	<i>Aspleinium castaneum</i>	<i>Cerastium nutans</i>	<i>Eryngium alternatum</i>	<i>Salvia elegnas</i>	<i>Gomphus</i>
	<i>Salix paradoxa</i>	<i>Fuchsia microphylla</i>	<i>Aspleinium monanthes</i>	<i>Drymaria laxiflora</i>	<i>Sabazia liebmanni</i>	<i>Salvia gesneriflora</i>	<i>Helvella</i>
		<i>Holodiscus argenteus</i>	<i>Astranthium orthopodum</i>	<i>Galium mexicanum</i>		<i>Senecio albonervius</i>	<i>Hygrophorus</i>
		<i>Monnina ciliolata</i>	<i>Cirsium ehrenbergii</i>	<i>Geranium potentillifolium</i>		<i>Senecio angulifolius</i>	<i>Inocybe</i>
		<i>Prionosciadium thapsoides</i>	<i>Dahlia scapigera</i>	<i>Liparis draculoides</i>		<i>Senecio baraba-johannis</i>	<i>Laccaria</i>
		<i>Ribes ciliatum</i>	<i>Eryngium alternatum</i>	<i>Oxalis alpina</i>		<i>Senecio salignus</i>	<i>Phaeocollybia</i>
		<i>Rumfordia floribunda</i>	<i>Satureja macrostema</i>	<i>Peperomia hispidula</i>		<i>Stevia lucida</i>	<i>Phylloporus</i>
		<i>Solanum brachystachys</i>	<i>Scutellaria caerulea</i>	<i>Sagina procumbens</i>			<i>Pophyrellus</i>
		<i>Solanum cervantesii</i>	<i>Sedum bourgaei</i>	<i>Sibthorpia repens</i>			<i>Russula</i>
		<i>Tournefortia densiflora</i>	<i>Senecio sanguisorbae</i>	<i>Viola sp.</i>			<i>Xerocomus</i>
		<i>Trisetum virletii</i>	<i>Senecio toluccanus</i>				Humícolas
		<i>Verbesina klatii</i>	<i>Eupatorium pazcuarensis</i>				<i>Armillariella</i>
		<i>Verbesina oncophora</i>	<i>Festuca amplissima</i>				<i>Clavaria</i>
			<i>Gnaphalium spp.</i>				<i>Clitocybe</i>
			<i>Penstemon roseus</i>				<i>Marasmius</i>
			<i>Penstemon campanulatus</i>				<i>Mycena</i>
			<i>Pernettya ciliata</i>				<i>Phlogiotis</i>
			<i>Physalis coztomatl</i>				<i>Pholiota</i>
			<i>Piptochaetium virescens</i>				<i>Ramaria</i>
			<i>Plecosorus speciosissimus</i>				

ANEXO IV

Principales taxa del bosque mesófilo de montaña de la cuenca del Lago de Zirahuén.					
Estrato arbóreo superior	Estrato arbóreo inferior	Estrato arbustivo y plantas sufrútices	Estrato herbáceo	Trepadoras	Epífitas
<i>Alnus acuminata</i> var. <i>arguta</i>	<i>Clethra hartwegii</i>	<i>Archibaccharis serratifolia</i>	<i>Amicia zygozeris</i>	<i>Bomarea hirtella</i>	<i>Encyclia venosa</i>
<i>Carpinus caroliniana</i>	<i>Cornus disciflora</i>	<i>Brickellia squarrosa</i>	<i>Asplenium monanthes</i>	<i>Celastrus pringlei</i>	<i>Erycina diaphana</i>
<i>Dendropanax arboreus</i>	<i>Dendropanax arboreus</i>	<i>Calliandra grandiflora</i>	<i>Blechnum occidentale</i>	<i>Clematis dioica</i>	<i>Laelia autumnalis</i>
<i>Pinus pseudostrobus</i>	<i>Meliosma dentata</i>	<i>Ceanothus caeruleus</i>	<i>Bletia campanulata</i>	<i>Ipomoea dumetorum</i>	<i>Lycopodium pringlei</i>
<i>Quercus castanea</i>	<i>Oreopanax echinops</i>	<i>Cestrum nitidum</i>	<i>Borreria laevis</i>	<i>Passifolia exsudans</i>	<i>Peperomia galioides</i>
<i>Quercus obtusata</i>	<i>Oreopanax xalapensis</i>	<i>Citharexylum affine</i>	<i>Calea integrifolia</i>	<i>Passifolia subpeltata</i>	<i>Polypodium</i> sp.
<i>Quercus rugosa</i>	<i>Podochaenium eminens</i>	<i>Cornus excelsa</i>	<i>Cheilantes farinosa</i>	<i>Phaseolus coccineus</i>	
<i>Salix bonplandiana</i>	<i>Syrax argenteus</i>	<i>Desmodium densiflorum</i>	<i>Cymbispatha commelinoides</i>	<i>Rhus radicans</i>	
	<i>Tilia mexicana</i>	<i>Eupatorium</i> spp.	<i>Cystopteris fragilis</i>	<i>Rhynchosia discolor</i>	
		<i>Fuchsia parviflora</i>	<i>Govenia superba</i>	<i>Smilax moranensis</i>	
		<i>Garrya laurifolia</i>	<i>Habenaria novemfida</i>	<i>Smilax pringlei</i>	
		<i>Indigofera</i> aff. <i>jaliscencis</i>	<i>Heliopsis buphthalmoides</i>	<i>Solanum appendiculatum</i>	
		<i>Kearnemalvastrum subtriflorum</i>	<i>Jaegeria hirta</i>		
		<i>Lippia umbellata</i>	<i>Lobelia laxiflora</i>		
		<i>Monnina ciliolata</i>	<i>Lobelia longicaulis</i>		
		<i>Montanoa frutescens</i>	<i>Asplenium praemorsum</i>		
		<i>Polymnia maculata</i>	<i>Begonia balmisiana</i>		
		<i>Rapanea juergensenii</i>	<i>Malaxis brachyrrhynchos</i>		
		<i>Rhamnus hintonii</i>	<i>Neobrittonia acerifolia</i>		
		<i>Rumfordia floribunda</i>	<i>Peperomia</i> sp.		
		<i>Senecio</i> spp.	<i>Perymenium globosum</i>		
		<i>Solanum lanceolatum</i>	<i>Phenax hirtus</i>		
		<i>Stevia subpudenscens</i>	<i>Priva aspera</i>		
		<i>Symplococos citrea</i>	<i>Pteridium aquilinum</i>		
		<i>Ternstroemia pringlei</i>	<i>Selaginella pallescens</i>		
		<i>Verbesina klattii</i>	<i>Sigesbeckia agrestis</i>		
		<i>Vernonia paniculata</i>	<i>Stevia monardifolia</i>		
		<i>Xylosma Flexuosum</i>	<i>Triodanis biflora</i>		

ANEXO V

Principales taxa de la vegetación tipo Pastizal desarrollada en la cuenca del lago de Zirahuén.		
Herbáceas del Pastizal del Cerro Burro	Gramíneas del pastizal de la Lagunita San Gregorio	Herbáceas y sufrútices del pastizal de la Lagunita San Gregorio
<i>Alchemilla procumbens</i>	<i>Aegopogon cenchroides</i>	<i>Agastache mexicana</i>
<i>Arenaria reptans</i>	<i>Agrostis schaffneri</i>	<i>Arenaria bourgaei</i>
<i>Arracacia atropurpurea</i>	<i>Agrostis toluensis</i>	<i>Aster subulatus</i>
<i>Cirsium toluacanum</i>	<i>Bromus carinatus</i>	<i>Botrychium schaffneri</i>
<i>Conyza</i> spp.	<i>Bromus diliochocarpus</i>	<i>Botrychium virginianum</i>
<i>Geranium potentillaefolium</i>	<i>Deschampsia liebmanniana</i>	<i>Cerastium nutans</i>
<i>Penstemon campanulatus</i>	<i>Muhlenbergia macrourea</i>	<i>Cirsium velatum</i>
<i>Penstemon roseus</i>	<i>Muhlenbergia ramulosa</i>	<i>Commelina coelestis</i>
	<i>Muhlenbergia utilis</i>	<i>Cyperus</i> spp.
	<i>Piptochaetium fimbriatum</i>	<i>Eleocharis montevidensis</i>
	<i>Piptochaetium virescens</i>	<i>Lupinus aschenbornii</i>
	<i>Poa annua</i>	<i>Nectouxia Formosa</i>
	<i>Setaria geniculata</i>	<i>Oxalis hernandesii</i>
	<i>Trisetum altiugum</i>	<i>Pedicularis mexicana</i>
	<i>Vulpia myuros</i>	<i>Phacelia platycarpa</i>
		<i>Physalis philadelphica</i>
		<i>Plantago australis</i>
		<i>Potentilla rubra</i>
		<i>Prunella vulgaris</i>
		<i>Salvia prunelloides</i>
		<i>Senecio sanguisorbae</i>
		<i>Erigeron galeottii</i>
		<i>Eryngium</i> spp.
		<i>Gnaphalium sarmentosum</i>
		<i>Halenia crassiuscula</i>
		<i>Halenia brevicornis</i>
		<i>Halenium scorzonifolium</i>
		<i>Helianthemum coulteri</i>
		<i>Hypoxis decumbens</i>
		<i>Jaegeria hirta</i>
		<i>Lotus repens</i>
		<i>Senecio toluccanus</i>
		<i>Sisyrinchium</i> spp.
		<i>Stachys repens</i>
		<i>Stevia jorullensis</i>
		<i>Tagetes foetidissima</i>
		<i>Trifolium ortegae</i>

ANEXO VI

Principales elementos de la vegetación acuática	
Vegetación acuática de los alrededores Opopeo y Santa Clara del cobre	Vegetación acuática de los alrededores de la Lagunita San Gregorio
<i>Aster subulatus</i>	<i>Apium leptophyllum</i>
<i>Berula erecta</i>	<i>Carex</i> spp.
<i>Cardamine longiflora</i>	<i>Cyperus</i> spp.
<i>Cyperus</i> spp.	<i>Eryngium</i> spp.
<i>Drymaria laxiflora</i>	<i>Hydrocotyle umbellata</i>
<i>Drymaria villosa</i>	<i>Jaegeria glabra</i>
<i>Echinochloa holciformis</i>	<i>Juncus ebracteatus</i>
<i>Galium trifidum</i>	<i>Ranunculus</i> spp.
<i>Jaegeria</i> spp.	<i>Rhynchosphora kunthii</i>
<i>Bidens aurea</i>	<i>Richardia tricocca</i>
<i>Bidens odorata</i>	
<i>Juncus</i> sp.	
<i>Leersia hexandra</i>	
<i>Lythrum vulneraria</i>	
<i>Melampodium divaricatum</i>	
<i>Mentha arvensis</i>	
<i>Polygonum</i> spp.	
<i>Simsia amplexicaulis</i>	
<i>Sisyrinchium</i> spp.	